

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Análisis comparativo de las tecnologías
Massive MIMO concentrado y distribuido en
entornos de interiores mediante trazado de
rayos**

**(Comparative analysis of concentrated versus
distributed massive MIMO technologies in indoor
environments using ray-traicing)**

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Javier Merino Polidura

Septiembre - 2021



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Javier Merino Polidura

Director del TFG: Rafael Pedro Torres Jiménez

Título: “Análisis comparativo de las tecnologías massive MIMO concentrado y distribuido en entornos de interiores mediante trazado de rayos”

Title: “Comparative análisis of concentrated versus distributed massive MIMO technologies in indoor environments using ray-traicing”

Presentado a examen el día: 21 de Septiembre de 2021

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Torres Jiménez, Rafael Pedro

Secretario (Apellidos, Nombre): Valle López, Luis

Vocal (Apellidos, Nombre): Manzano Ansorena, Miguel Ángel

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Índice

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Evolución y características de los sistemas 5G	6
1.2 Canal Radio	9
1.3 Objetivos.....	10
1.4 Estructura del documento	10
Capítulo 2. Caracterización de canales MIMO	12
2.1 Tecnología MIMO	12
2.2 MIMO Masivo	13
2.2.1 Métodos de codificación y detección	15
2.2.2 Metodología de caracterización del canal	17
2.3 MIMO distribuido.....	20
2.4 MIMO concentrado	21
Capítulo 3. Caracterización del canal radio.....	23
3.1 Trazado de rayos.....	23
3.2 Modelo 3D GO/UTD.....	24
3.3 Software.....	26
Capítulo 4. Resultados.....	30
4.1 Escenario de simulación	30
4.2 Parámetros básicos de las simulaciones	33
4.2.1 MIMO distribuido	35
4.2.2 MIMO concentrado	36
4.3 Análisis de la capacidad obtenida.....	38
4.3.1 Variación de la capacidad frente al número de usuarios activos.....	38
4.3.2 Análisis de la influencia de la proximidad de los usuarios en la capacidad alcanzable	50
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras.....	57
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Líneas futuras	58
Referencias	59

Índice de Figuras

Figura 1. Posibilidades de utilización del 5G que ofrece la Recomendación IMT-2020 de UIT-R.....	7
Figura 2. Evolución de las suscripciones móviles globales para diferentes dispositivos según [2].....	8
Figura 3. Evolución del tráfico móvil por diferentes tipos de servicios a nivel mundial según [2].....	9
Figura 4. Operación de enlace descendente en un enlace MIMO masivo. Fuente [8]	13
Figura 5. Modelo ideal de la tecnología MIMO para un canal utilizando N antenas transmisoras y receptoras. Fuente [13]	20
Figura 6. Diseño de dos tipos de MIMO masivo. (a) MIMO concentrado. (b) MIMO distribuido. Fuente [15]	22
Figura 7. Trazado de rayos creado en la herramienta de simulación CINDOOR.	24
Figura 8. Interfaz principal del software creado por GISAR.	26
Figura 9. Interfaz de la aplicación dedicada a calcular la función de transferencia.	27
Figura 10. Interfaz de la aplicación dedicada al cálculo de la capacidad.	28
Figura 11. CDF de la capacidad, comparando CINDOOR y un canal de tipo Rayleigh.	29
Figura 12. Vista vertical de la planta 0 de la ETSIT.	30
Figura 13. Vista frontal de la entrada de la ETSIT.	31
Figura 14. Vista frontal del pasillo derecho de la planta 0 de la ETSIT.	32
Figura 15. Modelo del escenario utilizado en CINDOOR.	32

Figura 16. Posición de los transmisores en el modelo de CINDOOR para realizar las simulaciones.	34
Figura 17. Posición de los transmisores en el modelo de CINDOOR para realizar las simulaciones de MIMO distribuido.	35
Figura 18. Posición de los transmisores y la estación base en el modelo de CINDOOR para realizar las simulaciones de MIMO concentrado. La línea verde representa un array de 100 antenas de la estación base.	36
Figura 19. Posición de los 5 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran juntos.	38
Figura 20. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 5 transmisores juntos.	39
Figura 21. Posición de los 5 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran separados.	40
Figura 22. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 5 transmisores separados.	41
Figura 23. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 5 transmisores activos....	42
Figura 24. Posición de los 10 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran juntos.	43
Figura 25. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 10 transmisores juntos...	43
Figura 26. Posición de los 10 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran separados.	44
Figura 27. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 10 transmisores separados.	45
Figura 28. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 10 transmisores activos..	46
Figura 29. Posición de los 14 transmisores escogidos.	47
Figura 30. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 14 transmisores.	47
Figura 31. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 20 transmisores.	49
Figura 32. CDF de la capacidad de los transmisores 7 y 7', y 7 y 12, utilizando el MIMO concentrado.....	50

Figura 33. CDF de la capacidad de los transmisores 7 y 7', y 7 y 12, utilizando el MIMO distribuido.....	51
Figura 34. CDF de la capacidad de los transmisores 4 y 4', y 4 y 6, utilizando el MIMO concentrado.....	52
Figura 35. CDF de la capacidad de los transmisores 4 y 4', y 4 y 6, utilizando el MIMO distribuido.....	52
Figura 36. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 10, utilizando el MIMO concentrado.....	53
Figura 37. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 10, utilizando el MIMO distribuido.....	54
Figura 38. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 6, utilizando el MIMO concentrado.....	55
Figura 39. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 6, utilizando el MIMO distribuido.....	55

Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas de la posición de los transmisores en el modelo de CINDOOR.....	34
Tabla 2. Coordenadas de la posición de la estación base y los transmisores y distancia entre la estación base y cada transmisor en el modelo de CINDOOR.	37
Tabla 3. Parámetros de la Figura 20.	39
Tabla 4. Parámetros de la Figura 22.	41
Tabla 5. Parámetros de la Figura 25.	44
Tabla 6. Parámetros de la Figura 27.	45
Tabla 7. Parámetros de la Figura 30.	48
Tabla 8. Parámetros de la Figura 31.	49

Capítulo 1. Introducción

1.1 Evolución y características de los sistemas 5G

Hoy en día, la demanda de los consumidores está propiciando el desarrollo de los servicios de banda ancha móvil. Esta demanda se multiplicará por entre 10 y 100 al final de la década actual. El incremento del número de dispositivos y servicios, y la demanda de una mejor experiencia de usuario requieren soluciones innovadoras. Por ello, la tecnología de quinta generación (5G) está cada vez más presente en el día a día [1].

Las redes 5G van a permitir el desarrollo de nuevos servicios que beneficiarán a la economía y a la sociedad en su conjunto. La capacidad de gestionar millones de dispositivos en tiempo real va a permitir entre otras cosas la fabricación inteligente en entornos de fabricación distribuidos, el control remoto de dispositivos en tiempo real (coche autónomo), o la gestión inteligente del transporte y de los recursos energéticos. Disponer de estos servicios exige al mismo tiempo establecer mejoras tecnológicas en los sistemas móviles. En las siguientes líneas se presentan algunas de las características que deberá cumplir una red para poder considerarse de quinta generación (5G), como se describen en [2]:

- Velocidad máxima Downstream soportable: 20 Gbps
- Velocidad máxima en el Uplink soportable: 10 Gbps
- Velocidad de Downstream en escenarios urbanos el 95% del tiempo: 100 Mbps
- Velocidad en el Uplink en escenarios urbanos el 95% del tiempo: 50 Mbps
- Latencia inferior a 1 ms
- Máxima velocidad de desplazamiento del dispositivo móvil: 500 km/h
- Densidad máxima de dispositivos: $10^6/\text{km}^2$

Estas características expuestas en los puntos anteriores están recogidas en el marco IMT-2020 correspondiente a la ITU. Los futuros sistemas IMT incorporarán muchas prestaciones diferentes entre sí. Estos, deberán diseñarse con el objetivo de que no sea necesario implementar todas las prestaciones en todas las redes, sino implementar aquellas prestaciones necesarias según las circunstancias y las distintas necesidades de cada país. En la Figura 1, se pueden observar algunos ejemplos de casos de utilización previstos de las IMT para 2020 y en adelante.

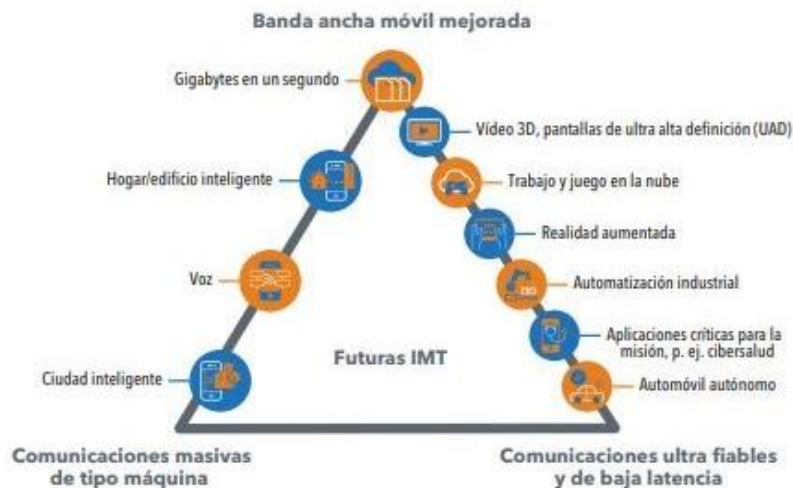


Figura 1. Posibilidades de utilización del 5G que ofrece la Recomendación IMT-2020 de UIT-R.

Para conseguir estos objetivos, se está trabajando en frecuencias mucho más altas. Las redes de telefonía celular 4G emiten señal en un rango de 700 MHz a 3500 MHz. Sin embargo, gran parte de la experimentación 5G de las compañías inalámbricas se está desarrollando a frecuencias que van desde los 3.2 GHz hasta los 73 GHz en algunos casos. La ventaja principal de este aumento es que a frecuencias altas son capaces de proporcionar velocidades de datos mucho más rápidas. La desventaja principal de este cambio es que su alcance es mucho más corto y tienen más dificultad en penetrar paredes. Por lo que los operadores tendrán que diseñar una red de células con mucho menos alcance que la anterior generación [3].

El avance tecnológico en los sistemas de comunicaciones móviles viene determinado por nuevos escenarios de uso. Por ello, en el caso de los sistemas de quinta generación, la UIT en la recomendación ITU-R M.2083 estableció los siguientes escenarios de uso contemplados para justificar dicho desarrollo tecnológico [4]:

- eMBB (Enhanced Mobile Broadband): es un escenario centrado en la alta tasa de transferencia de datos requerida, teniendo una densidad de usuarios también alta en una celda. Se requiere que la velocidad percibida por el usuario sea elevada, alcanzando estas velocidades para el 95% del tiempo. Para lograrlo, será necesario obtener una alta eficiencia espectral.
- mMTC (Massive Machine-type Communications): escenario centrado en el internet de las cosas (IoT), donde existe una elevada densidad de conexiones simultáneas, registrándose una gran cantidad de dispositivos de bajo consumo conectados simultáneamente y a la misma red.
- URLLC (Ultra-reliable and Low Latency Communications): este escenario está orientado a aplicaciones que requieran una alta fiabilidad, siendo su objetivo principal conseguir la mínima latencia, permitiendo una alta movilidad de los dispositivos.

Uno de los mayores desafíos para los próximos años va a ser hacer frente al considerable aumento de tráfico. Según el informe UIT-R M-2370-0 [5], los principales factores que influyen en este crecimiento son:

- Uso del video: los servicios de vídeo a la carta con contenido de alta resolución (HD/UHD) ocuparán dos tercios del todo el tráfico móvil.
- Proliferación de dispositivos: se prevén más de 1.400 millones de smartphones y tablets.
- Absorción de aplicaciones: se espera descargar más de 270.000 millones de aplicaciones.

En este informe también viene recogido algunas estimaciones de las previsiones de tráfico entre 2020 y 2030. Una de las estimaciones se puede ver en la Figura 2, en la que se muestra la evolución de las suscripciones móviles globales para diferentes dispositivos.

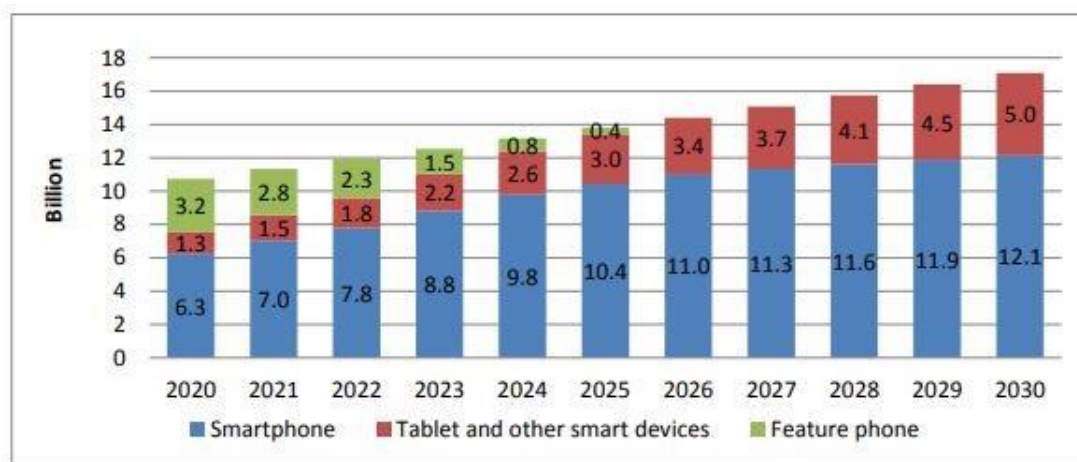


Figura 2. Evolución de las suscripciones móviles globales para diferentes dispositivos según [2].

En la imagen anterior, también se puede comprobar que se prevé la desaparición de los teléfonos no inteligentes para antes de 2030.

Otra estimación a tener en cuenta es la que se muestra en la Figura 3, en la cual se estima el tráfico móvil por el uso de diferentes servicios a nivel mundial.

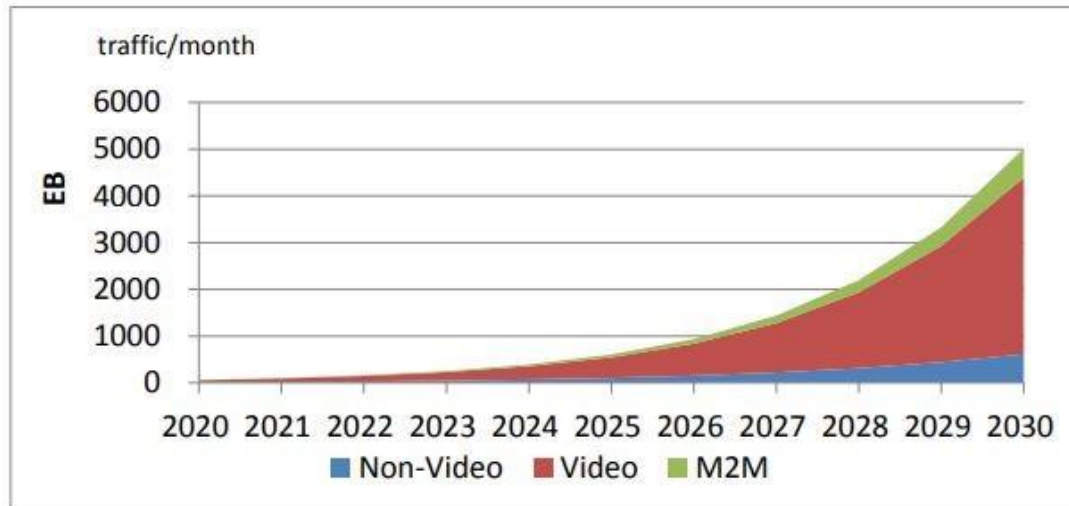


Figura 3. Evolución del tráfico móvil por diferentes tipos de servicios a nivel mundial según [2].

Como se observa en la figura anterior, el tráfico de Internet móvil y M2M (Máquina a Máquina) crecerá exponencialmente en los próximos años.

1.2 Canal Radio

En los sistemas de comunicaciones móviles el canal se comporta como un medio muy reflectivo y dispersivo, en el cual las estructuras como por ejemplo edificios, los bosques o el relieve del terreno donde se encuentre el radio canal, pueden ser muy influyentes. Otro de los factores que hay que tener en cuenta es el material del que esté construido las estructuras, o que haya en el entorno en el que se encuentre el usuario, ya que cada material tiene una conductividad y una constante dieléctrica diferente, y, por tanto, cada material afecta de diferente forma a la señal que incide sobre él. Además, hay otros muchos factores que pueden afectar al canal, como la frecuencia, las condiciones climáticas o los movimientos que puede haber en el recorrido del canal de personas, vehículos, animales, etc. En definitiva, el canal es variante en el tiempo y eso dificulta la propagación.

Por otro lado, para la implementación del 5G se propone aumentar la frecuencia de uso del espectro, ya que las bandas de frecuencia inferiores están congestionadas con otros servicios. Este aumento de las frecuencias de trabajo hace que la atenuación del canal a frecuencias más altas también lo haga. Como consecuencia, en las redes 5G se utilizan celdas de menor tamaño, llamadas pico-celdas, para que la atenuación afecte en menor medida.

En los últimos años se ha estado investigando y haciendo pruebas en la banda de frecuencias de 26 GHz y 28 GHz [6], y hoy en día ya se están subastando, ya que estas bandas permiten a los operadores cumplir con los requisitos de velocidad, latencia, confiabilidad y capacidad de 5G.

1.3 Objetivos

La tecnología MIMO está siendo primordial en la evolución de los sistemas de comunicaciones, y en concreto el MIMO masivo, es una de las tecnologías habilitadoras que va a permitir alcanzar los objetivos que se marcan para las conexiones 5G.

Por ello, y por sus múltiples ventajas frente a otras tecnologías más convencionales utilizadas en generaciones anteriores, en este TFG se va a trabajar sobre esta tecnología que está emergiendo.

Más concretamente, el objetivo de este TFG se centra en el análisis de los resultados de simulación obtenidos para canales MIMO Concentrado y MIMO Distribuido en un entorno de interior, y su posterior comparación utilizando un número variable de usuarios activos, para comprobar cuál tiene mejores prestaciones para el entorno utilizado en cada caso. Para ello, se utilizará la herramienta CINDOOR, basada en el trazado de rayos, a la hora de caracterizar canales MIMO masivos, y posteriormente el programa MATLAB, para realizar el procesamiento de los resultados obtenidos, y mostrar estos resultados en forma de gráficas. Este estudio se va a centrar en el cálculo de la capacidad de los tipos de canales utilizados, y la frecuencia utilizada se va a situar en la banda de los 26 GHz.

1.4 Estructura del documento

La organización de este documento se va a realizar en base a 5 capítulos diferentes. Este capítulo es el primero, en el que se da una introducción del trabajo que se ha realizado.

En el segundo capítulo se va a tratar los aspectos más importantes de la caracterización del canal MIMO. Se va a hablar de esta tecnología, de su evolución hacia el MIMO masivo y sus aspectos más importantes. Por último, se va a comentar dos de los sistemas utilizados para la realización de este trabajo: el MIMO masivo concentrado y el MIMO masivo distribuido.

En el tercer capítulo se va a comentar la caracterización del canal radio que se ha utilizado en la realización de este trabajo. Se va a hablar de las características utilizadas por la herramienta CINDOOR para realizar las simulaciones, como el trazado de rayos o la utilización del modelo 3D GO/UTD para modelar los diferentes mecanismos de propagación. Además, también se va a comentar el software utilizado en la herramienta MATLAB para obtener la función de transferencia y la CDF de la capacidad de las simulaciones de CINDOOR.

En el cuarto capítulo se va a comentar el escenario utilizado para realizar las simulaciones y los parámetros utilizados para realizar estas. Además, se van a exponer los resultados obtenidos, y se van a hacer algunos comentarios sobre ellos.

Finalmente, en el quinto y último capítulo, se comentarán las conclusiones del trabajo con los resultados obtenidos, y se hablará sobre las posibles líneas futuras a raíz de este TFG.

Capítulo 2. Caracterización de canales MIMO

En este capítulo se va a presentar la tecnología MIMO masivo, la cual se está empezando a utilizar en los sistemas 5G, y es la que ha motivado la caracterización del canal radio llevada a cabo en este trabajo. Se va a hablar de los principios del sistema MIMO, más tarde de las características y técnicas utilizadas por este sistema. Además, se van a comentar los dos sistemas de MIMO masivo considerados en este trabajo: El MIMO masivo concentrado y el MIMO masivo distribuido.

2.1 Tecnología MIMO

La evolución y el desarrollo de la quinta generación de sistemas de comunicaciones móviles (5G), así como el desarrollo de la sexta generación (6G), requerirá un uso óptimo del canal radio, mejorando la eficiencia espectral. Además, la tecnología de transmisión inalámbrica de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) ha abierto una nueva era de desarrollo y utilización de recursos espaciales en los sistemas de comunicaciones móviles. La palabra MIMO es el acrónimo inglés que significa Multiple Input Multiple Output, que se refiere a que se utiliza múltiples antenas en el transmisor y múltiples antenas en el receptor. Esta nueva tecnología ha superado la limitación de los recursos bidimensionales (frecuencia-tiempo) y permite la utilización de recursos tridimensionales(frecuencia-tiempo-espacio).

En un sistema de comunicación móvil se puede mejorar la capacidad utilizando múltiples antenas en las estaciones base y los terminales móviles. Los dos aspectos principales que aporta MIMO son los siguientes [7]:

- Diversidad espacial: Referida a la diversidad de transmisión y recepción. Estas dos metodologías se utilizan para mejorar la relación señal/ruido y se caracterizan por mejorar la fiabilidad del sistema con respecto a los posibles desvanecimientos.
- Multiplexación espacial: Se utiliza para proporcionar capacidad de datos adicional utilizando las diferentes rutas para transportar tráfico adicional, es decir, aumentando la capacidad de rendimiento de datos.

Esta tecnología inalámbrica MIMO es una de las técnicas inalámbricas más importantes empleadas en los últimos años, ya que el ancho de banda se está convirtiendo en un bien muy valioso, y con esta técnica se aprovecha este ancho de banda de una manera eficaz respetando las leyes establecidas.

2.2 MIMO Masivo

El empleo de MIMO, ya utilizado en la comunicación inalámbrica de tercera generación (3G) y cuarta generación (4G), ha mejorado la fiabilidad de enlace y aumentado la capacidad. El MIMO Masivo (Massive MIMO) nace por las propuestas de aumentar el número de antenas, sobre todo en la estación base, con el objetivo principal aprovechar las grandes ganancias de capacidad.

Además, con este sistema se ha conseguido entre otras cosas una mayor robustez, ya que la enorme cantidad de antenas disminuye el impacto que se tendría en el caso de que alguna fallase, y un menor nivel de potencia requerido respecto a otros sistemas, gracias al número de antenas utilizado y al procesamiento que se hace con ellas.

Otra de las ventajas de esta tecnología se centra en la mejora de cobertura, ya que los usuarios pueden disfrutar de una experiencia más uniforme en toda la red, incluso en el borde de la célula.

En la Figura 4 se puede observar un ejemplo de este sistema. En este caso, la conexión se realiza en el enlace descendente. Los enlaces modernos utilizan la multiplexación por división de tiempo y la multiplexación por división de frecuencia para conseguir que cada usuario reciba solamente la señal con la información que debe recibir, minimizando la interferencia con las otras señales de usuarios diferentes.

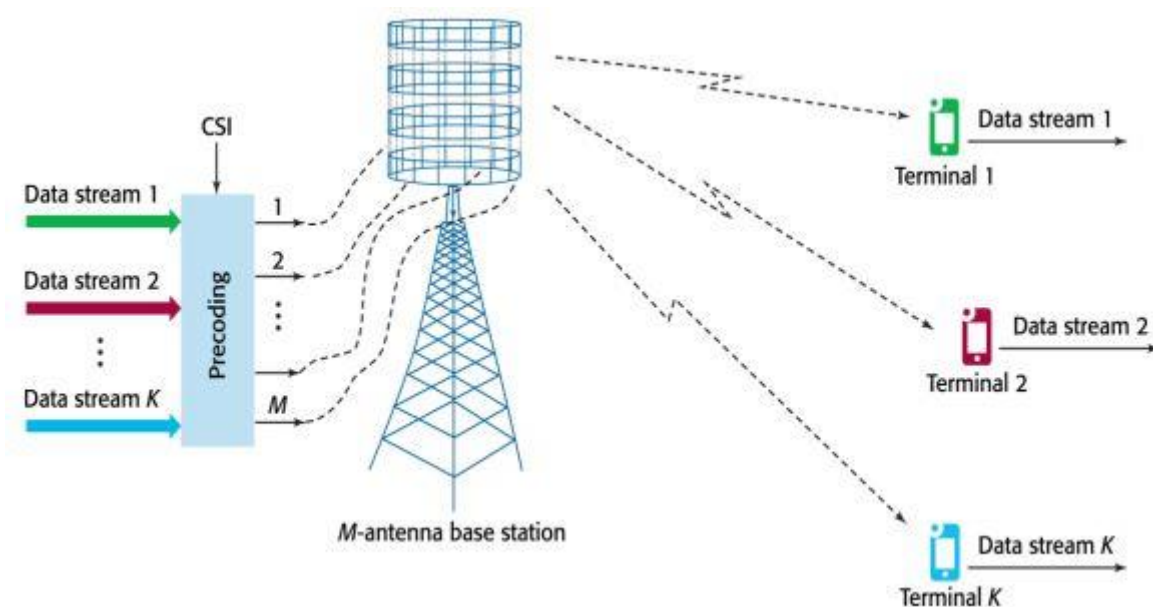


Figura 4. Operación de enlace descendente en un enlace MIMO masivo. Fuente [8]

Sin embargo, Massive MIMO utiliza la multiplexación de división espacial. Por lo tanto, es capaz de enviar información a usuarios diferentes en el mismo slot temporal y a la misma frecuencia. Para conseguirlo, se utiliza la multiplexación espacial, en la cual se controla un conjunto de antenas de forma independiente. Si el enlace se encuentra bajo condiciones de propagación de línea de visión, los flujos de datos se transforman en haces de datos direccionados. En el caso en el que se contemple un entorno de propagación desordenado, los flujos de datos llegan a su destino desde muchas direcciones simultáneamente [8].

Además, la tecnología MIMO Masivo se utiliza el Beam Forming, una técnica de filtrado espacial que tiene como objetivo mejorar la eficiencia espectral y energética y aumentar la seguridad del sistema. Funciona enviando múltiples señales y analizando el feedback de los dispositivos clientes. Así, la infraestructura de la red inalámbrica puede ajustar estas señales enviadas y determinar cuál es el mejor camino que deben tomar para alcanzar estos dispositivos receptores.

El Beam Forming utiliza una técnica llamada Direction Sensing, mediante la cual los radios comprueban la dirección de entrada de la señal recibida para luego enfocar la transmisión en esa misma dirección, incrementando la fuerza de la señal inalámbrica en ese sentido. Las características más destacadas del Beam Forming son las siguientes:

- Coordina la señal enviada a cada antena, por lo cual los dispositivos receptores ven mejorada su señal del enlace.
- Se utiliza cuando el receptor sólo tiene una antena.
- Utiliza Directional Sensing y Multi-Path para lograr caminos más eficientes y mejor enfocados, acortando los tiempos de envío/recepción de la señal, obteniendo a la vez estabilidad en los enlaces.
- Permite un mayor ancho de banda.
- Mientras que otros dispositivos sufren los efectos del rebote de señal, Beam Forming los capitaliza y combina coherentemente hacia el cliente.
- Permite la cobertura dinámica para los usuarios en movimiento (Por ejemplo, los usuarios que viajan en vehículos).

Aunque MIMO masivo tiene grandes prestaciones como se han nombrado, también tiene algunos inconvenientes [9], como son:

- Contaminación de pilotos: El desempeño de MIMO masivo depende estrechamente de la exactitud de la estimación de canal (información CSI). Idealmente, se asignan a los terminales en el enlace ascendente pilotos mutuamente ortogonales. Pero el número de secuencias posibles ortogonales está limitado por el cociente entre el tiempo de coherencia del canal y la dispersión de retardo de este. Por ello, en los despliegues celulares, habrá que reutilizar pilotos, con el riesgo de que cada piloto sufra interferencias con aquellos que comparte recursos.

- Al proponer TDD, como las frecuencias de transmisión y recepción son iguales, se supone que el comportamiento del canal es el mismo en el enlace ascendente y descendente. Esta hipótesis es razonablemente válida para la radio propagación, pero puede no serlo para los dispositivos físicos de las cadenas de transmisión y recepción.

En cuanto a la capacidad que ofrece esta tecnología, considerando las transmisiones ascendentes, en condiciones de propagación favorables, esto es, si los vectores de ganancias del canal radio entre terminales y BS son ortogonales, la capacidad global del canal ascendente para M antenas y K usuarios es

$$C_{total} = K \log_2(1 + M \rho) \quad (2.1)$$

Donde ρ es la sinr media del enlace ascendente. Por lo tanto, de esta expresión se puede deducir que puede obtenerse una ganancia de configuración de antenas igual a M y una ganancia de multiplexación espacial igual a K . En principio, bajo estas condiciones favorables de propagación y con un procesamiento óptimo en la BS, puede conseguirse una capacidad todo lo grande que se quiera, limitada por las restricciones técnicas de aumentar M indefinidamente.

Por último, hay que mencionar que la tecnología MIMO masivo tiene dos ramas diferentes en función de la colocación de las antenas repartidas en el espacio. Por un lado, en el que todas las antenas están concentradas en un espacio pequeño, donde la separación entre ellas es del orden de la longitud de onda, como ocurre en los arrays clásicos, se estará hablando de MIMO masivo concentrado. Sin embargo, si las antenas están repartidas a lo largo de todo el escenario en el que se quiere dar cobertura, se estará hablando de MIMO masivo distribuido. Estos dos sistemas diferentes serán tratados en los apartados 2.3 y 2.4.

En los siguientes apartados, se va a comentar algunos de los métodos de codificación que se utilizan en esta tecnología, y, por otro lado, se va a explicar las expresiones matemáticas utilizadas para la caracterización del canal que se ha realizado en las simulaciones de este TFG.

2.2.1 Métodos de codificación y detección

Los sistemas MIMO masivo utilizan la multiplexación espacial. Por este motivo, es muy importante la codificación y decodificación de la señal para lograr el rendimiento deseado. El énfasis de esta sección reside en algunas de las técnicas más usadas para la adecuación de la señal transmitida y el procesamiento de la señal recibida en sistemas de este tipo. Por otra parte, el principal objetivo que se tiene cuando se utilizan estas técnicas es el de contrarrestar el efecto

del canal y minimizar las interferencias que se puedan producir, con el fin de que la señal recibida se parezca lo más posible a la señal transmitida [10].

El sistema MIMO utilizado en este trabajo presupone un canal plano en frecuencia. Con esta premisa se definen:

- Número de antenas transmisoras N_{Tx} y receptoras N_{Rx} .
- Número de flujos de información $Z < \min(N_{Tx}, N_{Rx})$
- Canal que enlaza la antena receptora i -ésima con la antena transmisora j -ésima:

$$h_{i,j} = h_{i,j}$$

- Matriz de los canales del sistema: $H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,N_{Tx}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_{Rx},1} & \dots & h_{N_{Rx},N_{Tx}} \end{bmatrix}$
- Vector de símbolos de los Z flujos de información d ($Z \times 1$ dimensiones)
- Señal transmitida por la antena j -ésima x_j y por todas las antenas $x = [x_1 \dots x_{N_{Tx}}]^T$
- Señal recibida por la antena i -ésima y_i y por todas las antenas $y = [y_1 \dots y_{N_{Rx}}]^T$
- Símbolos detectados a partir de y : s ($Z \times 1$ dimensiones)

De modo que algunas posibles técnicas de implementar en el procesamiento de la señal son:

- Combinación de ganancia máxima (MRC: “Maximal Ratio Combining”): Su objetivo es el de mitigar el desfase que produce el canal sobre la señal transmitida y para ello la señal recibida se pondera con unos pesos que contrarrestan la fase que añade el canal. Esta técnica se caracteriza por su simple complejidad matemática y la poca capacidad de cálculo requerida.

Dependiendo de si el MRC se aplica en el procesamiento de banda base del emisor o del receptor, su implementación resulta:

❖ MRC sobre los símbolos a transmitir:

$$x = H^* d \quad (2.2)$$

❖ MRC sobre los símbolos recibidos:

$$s = H^H y \quad (2.3)$$

- Forzador de ceros (ZF: “Zero Forcing”): Esta técnica requiere de una complejidad matemática superior, pero se suele utilizar por su eficiencia frente a la existencia de interferencias. El principal objetivo del ZF es considerar cada pareja de antenas de un sistema MIMO como un sistema SISO aislado con el fin de eliminar las interferencias de otras señales [11]. Matemáticamente, esta técnica se basa en aplicar la matriz pseudo-

inversa de H (H^+) sobre el vector recibido. La principal desventaja de esta técnica es que se amplifica considerablemente la potencia de ruido.

- Descomposición en valores singulares (SVD: "Single Value Descomposition"): Esta técnica presenta un rendimiento parecido al ZF. Sin embargo, requiere de una menor capacidad de cómputo ya que no es necesario obtener pseudo-inversas de matrices. Se basa en adecuar los símbolos que se desean transmitir de manera que dicha transmisión se realice a través de canales ortogonales que no creen interferencia. El desarrollo matemático comienza con la descomposición en valores singulares de la matriz H ,

$$H = U \Sigma V^H \quad (2.4)$$

Siendo U una matriz de $M_R \times Z$ dimensiones, Σ una matriz diagonal $Z \times Z$ dimensiones y V una matriz de $M_T \times Z$ dimensiones. Por lo tanto, el procesado en banda base del emisor y la señal que recibe son

$$x = V d \quad (2.5)$$

$$y = H x + n = H V d + n \quad (2.6)$$

Posteriormente, el post-procesado en banda base del receptor permite recuperar los símbolos de los Z flujos de información.

$$s = U^H y = U^H H V d + U^H n = U^H (U \Sigma V^H) V d + U^H n = \Sigma d + U^H n \quad (2.7)$$

Como Σ es una matriz diagonal, es posible recuperar los Z flujos de información de forma independiente, sobre los cuales se ha añadido un ruido modificado ligeramente por U^H . La ventaja del SVD frente a ZF es que la potencia de ruido no se modifica ya que U^H es una matriz unitaria.

2.2.2 Metodología de caracterización del canal

En este apartado se va a explicar las expresiones matemáticas utilizadas para la caracterización de canal que se ha realizado en las simulaciones de este TFG. Este análisis se va a realizar en el enlace ascendente (UL).

En primer lugar, el sistema MIMO masivo considerado es un sistema celular simple donde la estación base está equipado con antenas M . El número de usuarios activos se representa

con una Q , y cada usuario está equipado con una sola antena. Se asume que los usuarios transmiten una potencia total P . Además, se asume que la estación base conoce el canal y que los usuarios no están colaborando entre sí. Además, para el análisis consideramos un sistema OFDM con subportadoras N_f , que corresponden a los tonos medios.

Considerando este modelo, la forma vectorial de la señal recibida en la estación base para la subportadora o tono k -th cuando los usuarios Q están activos está dada por [12]:

$$y[k] = \sqrt{SNR} G[k] s[k] + n[k] \quad k = 1, 2, 3, \dots, N_f \quad (2.8)$$

Donde $y[k]$ es un vector columna con M elementos correspondientes a la subportadora k -th; $G[k]$ es la matriz del canal; $s[k]$ es un vector que representa las señales transmitidas por los usuarios; y $n[k]$ es un vector de ruido gaussiano complejo con elementos de varianza unitarios independientes y distribuidos de forma idéntica (i.i.d). Por último, la SNR representa la relación señal-ruido en el receptor.

Por otro lado, la matriz G se puede normalizar a partir de varias expresiones, en las que existen dos matrices de normalización diferentes para obtener la matriz G normalizada:

$$G = G' J \quad (2.9)$$

La matriz de normalización J es una matriz diagonal de orden $Q \times Q$. Como se ha nombrado, se consideran dos normalizaciones que se denotan como normalización de usuario y normalización global, también llamadas normalización 1 (N1) y normalización 2 (N2) respectivamente.

En el primer caso, utilizando N1, la matriz de normalización J es una matriz diagonal de orden $Q \times Q$, cuyos elementos (j_{qq}) vienen dados por la siguiente expresión:

$$j_{qq} = \sqrt{\frac{M}{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} \|g'_q[k]\|^2}} \quad q = 1, 2, \dots, Q. \quad (2.10)$$

Los elementos de la matriz de normalización J toman valores diferentes para que todas las columnas en G se normalicen a uno; en consecuencia, se elimina el desequilibrio de potencia entre los canales correspondientes a cada usuario, aunque las variaciones de canal entre las antenas dentro de la matriz del receptor y los tonos de frecuencia se mantienen. La matriz normalizada resultante, G , puede interpretarse como aquella asociada a un sistema en el que se

realiza un control de potencia ideal. En este caso, la potencia total disponible transmitida por los usuarios no se distribuye equitativamente, pero a cada usuario se le asigna la potencia necesaria para que todos los usuarios lleguen a la estación base con la misma potencia media. La normalización N1 se utiliza cuando el objetivo es aislar el efecto del desequilibrio de potencia y analizar exclusivamente la ortogonalidad del canal.

Por otro lado, utilizando N2, está definido de tal manera que todos los elementos de la matriz diagonal J son iguales y, por lo tanto, la operación en (2.11) es equivalente a multiplicar la matriz por un escalar:

$$j_{qq} = \sqrt{\frac{MQ}{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} \|G'_q[k]\|_F^2}} \quad q = 1, 2, \dots, Q. \quad (2.11)$$

Esta normalización mantiene la diferencia entre la potencia recibida de diferentes usuarios, antenas receptoras y tonos de frecuencia. La ventaja de N2 es que conserva la estructura original del canal y el efecto que el desequilibrio de potencia puede tener en el sistema.

Por último, se puede calcular la capacidad suma para tener una medida directa de la calidad del canal. Siempre y cuando se tenga un conocimiento perfecto del canal en la estación base, se podrá obtener la capacidad suma del sistema masivo MIMO-OFDM por medio de la descomposición en valores singulares de la matriz del canal como

$$C[k] = \sum_{q=1}^Q \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{Q} \lambda_q[k] \right); \quad k = 1, 2, \dots, N_f \quad (2.12)$$

Donde λ_q representa el valor propio q-ésimo de la matriz $G^H G$ y Q el número de usuarios activos.

2.3 MIMO distribuido

El MIMO distribuido es una forma generalizada de la tecnología de transmisión inalámbrica clásica de MIMO. Pero a diferencia de este último, las diferentes antenas del MIMO distribuido se encuentran en diferentes posiciones geográficas. Este sistema, se puede aplicar, además de a un sistema de estación base celular de una sola célula, a una estación base celular multicelulares reemplazándolas por un sistema de comunicación libre de células en forma de un MIMO multiusuario distribuido (MU-MIMO), también denominado cell-free MIMO.

Por otro lado, D-MIMO puede evolucionar más hacia un modo de red inalámbrica más complejo. Tradicionalmente, el enlace ascendente y descendente inalámbrico de los sistemas de comunicación se diseñan de manera ortogonal. Sin embargo, en los últimos años, se han desarrollado nuevos métodos de reutilización de recursos inalámbricos como dúplex flexible y dúplex completo para adaptarse a la demanda de asignación de recursos inalámbricos [13].

El sistema MIMO distribuido combina las ventajas de MIMO y las tecnologías de antenas distribuidas para mejorar notablemente la utilización de recursos del espectro, además de la cobertura inalámbrica. Este sistema cambia la arquitectura de los sistemas celulares tradicionales. La unidad de antena está separada del sistema de comunicación móvil, también llamada unidad de antena remota (RAU). Estas antenas remotas, están conectadas mediante fibras ópticas a la unidad de banda base (BBU), donde se realiza el procesamiento de señales conjuntas para que múltiples usuarios sean soportados en los mismos recursos de frecuencia de tiempo. Por lo cual, es posible mejorar la eficiencia espectral y la cobertura del sistema y el rendimiento en el borde celular.

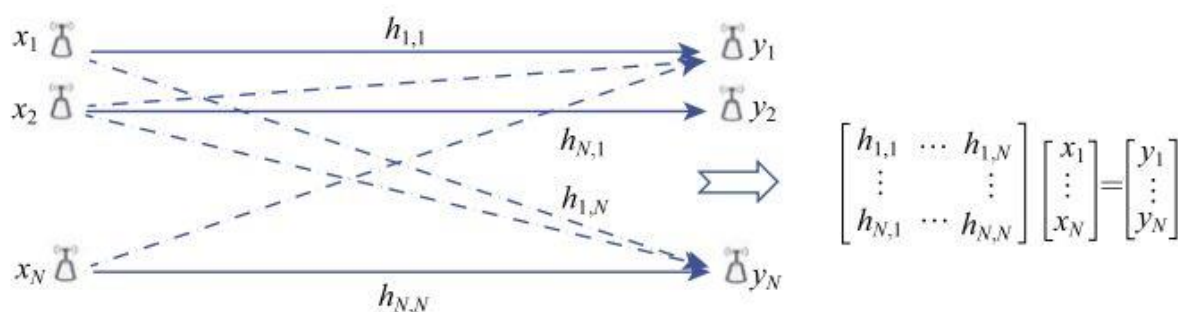


Figura 5. Modelo ideal de la tecnología MIMO para un canal utilizando N antenas transmisoras y receptoras. Fuente [13]

En la Figura 5 se muestra un modelo ideal de la tecnología MIMO de canal N. En este ejemplo, si las N antenas del transmisor se colocan en diferentes posiciones geográficas, formarán un MIMO distribuido. La información del estado del canal (CSI) se puede describir con una matriz $N \times N$. Si esta matriz es conocida e invertible, se puede eliminar la diafonía generada entre los N canales inalámbricos a través de la resolución de ecuaciones lineales. Esta tecnología da pie a la multiplexación espacial de la comunicación inalámbrica. Además, en el caso de que la matriz sea invertible, también aumentara la tasa de transmisión y la capacidad del sistema.

2.4 MIMO concentrado

Por otra parte, el MIMO concentrado es otro sistema propio del MIMO masivo, diferenciado del MIMO masivo distribuido por el diferente posicionamiento de las antenas. En una red MIMO masivo concentrada, todas las antenas están ubicadas en una sola estación base para cada celda. Los usuarios del borde celular generalmente sufren una pérdida de señal mucho mayor que los usuarios que se encuentran en el centro celular [14].

En el MIMO concentrado, las condiciones de canal para los diferentes elementos de antena son casi las mismas, ya que todas se encuentran prácticamente en la misma posición. Por lo tanto, no experimentas una degradación del número enlaces debido a la supuesta interferencia MIMO, ya que en este caso todas las señales serán afectadas de la misma forma. Por lo tanto, a diferencia del MIMO distribuido, o se tiene todos los enlaces transmitidos o no se tiene ninguno

Como se puede observar en la Figura 6, comparando el MIMO concentrado con el MIMO distribuido, en este último se debe construir un número mucho mayor de ubicaciones de antena, y se debe colocar una cantidad significativa de fibra para conectar las antenas desde las estaciones base distribuidas hasta la CPU. Por lo tanto, el diseño del MIMO distribuido es mucho más complicado de implementar, y tiene un mayor costo con respecto al MIMO concentrado [15].

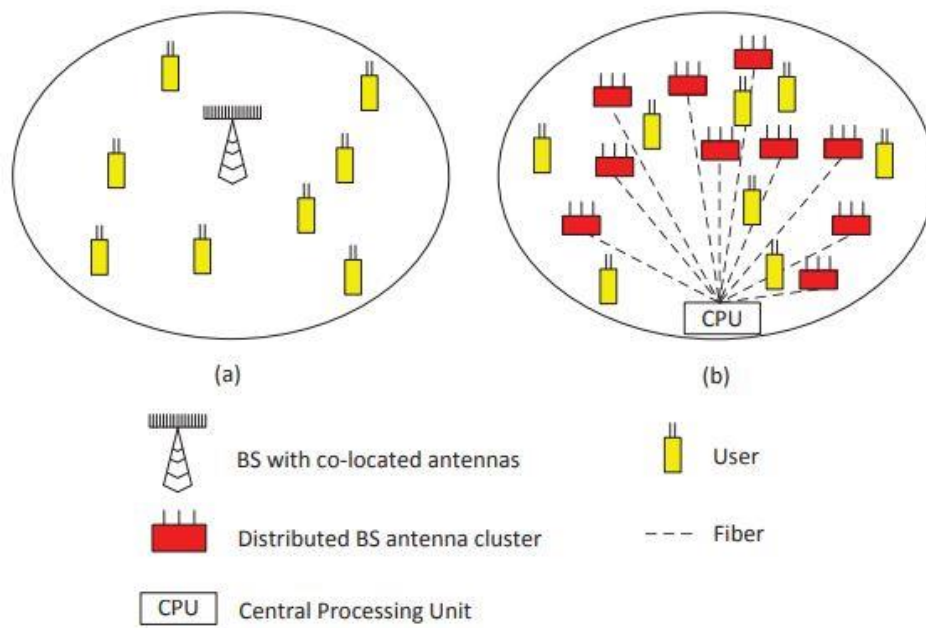


Figura 6. Diseño de dos tipos de MIMO masivo. (a) MIMO concentrado. (b) MIMO distribuido.
Fuente [15]

Por ello, en un sistema celular 5G donde se pretende emplear MIMO masivo es de gran importancia práctica comparar el rendimiento ofrecido de las redes celulares bajo diferentes diseños de ubicación de antenas para determinar si el aumento de costo está justificado.

Capítulo 3. Caracterización del canal radio

3.1 Trazado de rayos

En este trabajo, la caracterización del canal radio se ha realizado mediante la técnica de trazado de rayos. Para ello, se ha utilizado la herramienta para llevar a cabo las simulaciones llamada CINDOOR, una herramienta de software desarrollada por el Grupo de Ingeniería de Sistemas, Antenas y Radiopropagación (GISAR) de la Universidad de Cantabria.

CINDOOR se basa en una implementación tridimensional completa de la Óptica Geométrica junto con la Teoría Uniforme de Difracción (GO/UTD), de la que se hablará en el siguiente apartado. Este simulador proporciona resultados de banda estrecha o banda ancha útiles para aplicaciones de comunicaciones móviles como mapas de cobertura, estadísticas de desvanecimiento, perfil de retardo de potencia, ancho de banda de coherencia, etc [16].

Este simulador permite al usuario introducir la descripción geométrica de los escenarios interiores en los que se desea trabajar, a través de un conjunto de placas planas, cada una de ellas con sus propias propiedades electromagnéticas, como la conductividad, la constante dieléctrica o la rugosidad, dependiendo del material y el grosor. El simulador de cobertura incluye una base de datos con materiales que suelen encontrarse en los edificios que pueden modificarse y ampliarse.

En CINDOOR, se utiliza una combinación de la Teoría de la Imagen y el algoritmo de Particionamiento de Espacio Binario (BSP), para conseguir un método de trazado de rayos eficiente. Además, se aprovecha la experiencia en el rastreo de rayos frecuentemente usadas en otras disciplinas científicas.

Por otro lado, en este programa se consideran como mecanismo de acoplo entre las antenas transmisoras y receptoras tanto los rayos directos, como los reflejados (se permite hasta una séptima reflexión antes de llegar al receptor), los rayos difractados y combinaciones de rayos difractados-reflejados o reflejados-difractados. En el caso de este trabajo, se han utilizado tanto el rayo directo como los rayos reflejados hasta el cuarto orden.

El programa te da la posibilidad de representar gráficamente el trazado de rayos dibujando en el escenario elegido todos los rayos posibles con los parámetros utilizados entre el transmisor y el receptor.

En la Figura 7 se puede observar un ejemplo del trazado de rayos simulado en CINDOOR.

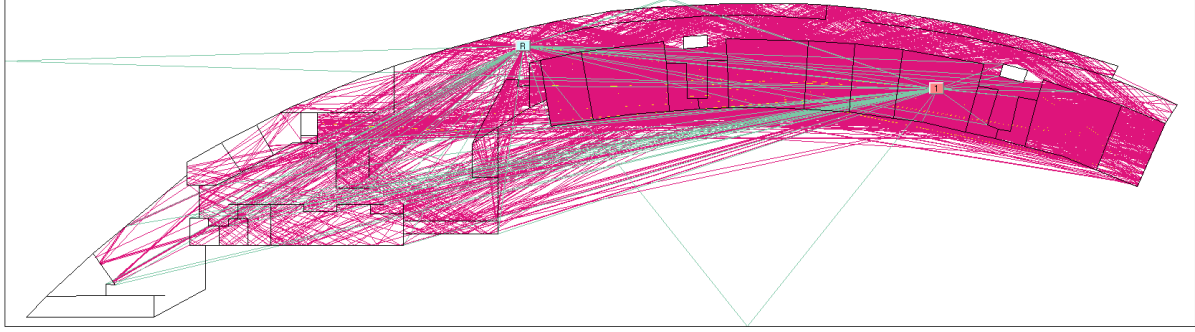


Figura 7. Trazado de rayos creado en la herramienta de simulación CINDOOR.

En este ejemplo, se ha simulado un enlace utilizando el rayo directo, las cuatro primeras reflexiones y la primera difracción. Las líneas representan el trazado de rayos calculado por CINDOOR desde el transmisor hasta el receptor.

3.2 Modelo 3D GO/UTD

Este modelo es el que utiliza CINDOOR para modelar los diferentes mecanismos de propagación. Se trata de un modelo de propagación de radio específico del sitio, y emplea el enfoque de rayos o de alta frecuencia con una implementación tridimensional de la aproximación GO/UTD.

En esta aproximación, la propagación del campo electromagnético (EM) se modela como rayos, con cada rayo teniendo un frente de onda asociado, un valor vectorial del campo EM, y un término de fase [17]. Si el campo EM se conoce en un punto Q_i , entonces se puede calcular fácilmente para otro punto Q_s :

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_i)A(s)e^{-jks} \quad (3.1)$$

Donde s es la distancia entre Q_i y Q_s , $A(s)$ es el factor de propagación que explica las pérdidas de energía a medida que el rayo se propaga, y depende de la forma del frente de onda, y el término exponencial determina la diferencia de fase que existe entre ambos puntos. Si el punto Q_i es el punto donde se encuentra la antena transmisora (T_x), el campo de la antena transmisora se puede escribir como sigue:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{K}_0 \frac{e^{-jks}}{s} \quad (3.2)$$

Donde K_0 es una característica del tipo de antena transmisora. Si el rayo que viaja de la antena T_x a un punto Q_s , intercepta una placa del modelo, el campo se atenúa, y la expresión que lo explica es la siguiente:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{K}_0 \bar{T} \frac{e^{-jks}}{s} \quad (3.3)$$

Donde \bar{T} es la matriz de transmisión, que tiene en cuenta las características electromagnéticas de la placa interceptada, el ángulo de incidencia y la polarización.

Otro mecanismo de acoplamiento entre el receptor y las antenas transmisoras se produce cuando un rayo proveniente del transmisor T_x , llega al receptor después de reflejar desde una placa en el punto Q_r . En este caso, el campo en el punto receptor (Q_s) puede calcularse a partir del conocimiento del campo que incide en el punto de reflexión, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_r) \bar{R} A'(s) e^{-jks} \quad (3.4)$$

En esta ecuación, s es la distancia entre Q_r y Q_s , y el factor de propagación $A'(s)$ suele depender de la curvatura de la superficie. Para casos en los que la superficie sea plana, el factor de propagación es $A'(s) = 1/s$. \bar{R} es la matriz de reflexión, que da cuenta de los cambios de magnitud, fase y polarización que el campo sufre cuando se produce una reflexión.

Las matrices de transmisión y reflexión, T y R respectivamente, pueden reducirse a matrices 2×2 si el campo electromagnético está escrito en el sistema de coordenadas de rayos:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} T_{\perp} & 0 \\ 0 & T_{\parallel} \end{bmatrix}, \bar{R} = \begin{bmatrix} R_{\perp} & 0 \\ 0 & R_{\parallel} \end{bmatrix}$$

Donde $T_{\perp, \parallel}$ y $R_{\perp, \parallel}$ representan los coeficientes de transmisión y de reflexión de las componentes de campo perpendiculares y paralelas al plano de incidencia.

Por último, si el transmisor y el receptor están conectados por un rayo difractado, entonces se usa la expresión que relaciona el campo incidente con el campo difractado:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_d) \bar{\bar{D}} A''(s) e^{-jks} \quad (3.5)$$

En esta última ecuación, $A''(s)$ representa el factor de propagación, s la distancia entre T_x y Q_d , y $\bar{\bar{D}}$ es una nueva matriz que relaciona el campo antes y después del proceso de difracción

3.3 Software

Una vez realizadas todas las simulaciones en CINDOOR, se ha realizado el procesado de las medidas en la herramienta de programación MATLAB. Para ello, se ha utilizado una aplicación que ha sido creado por el grupo GISAR de la Universidad de Cantabria. En la Figura 8 se puede observar la interfaz principal de la aplicación.

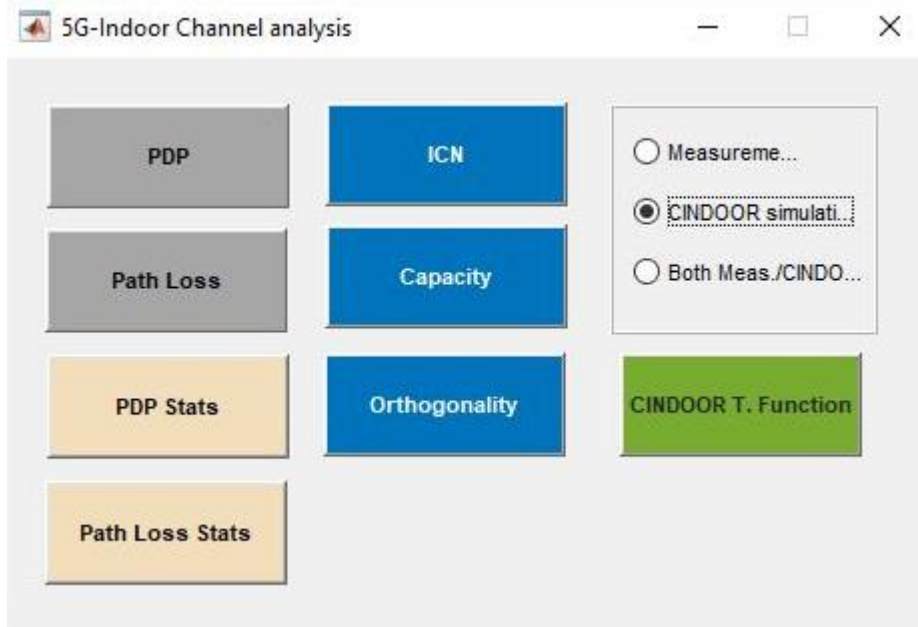


Figura 8. Interfaz principal del software creado por GISAR.

En primer lugar, se ha obtenido la función de transferencia del canal para cada simulación realizada en CINDOOR. Para ello, se ha pinchado en el botón inferior derecho de color verde de la figura anterior, teniendo seleccionado la opción “CINDOOR simulation”. Una vez seleccionado, se abre una nueva ventana que está representada gráficamente en la Figura 9:

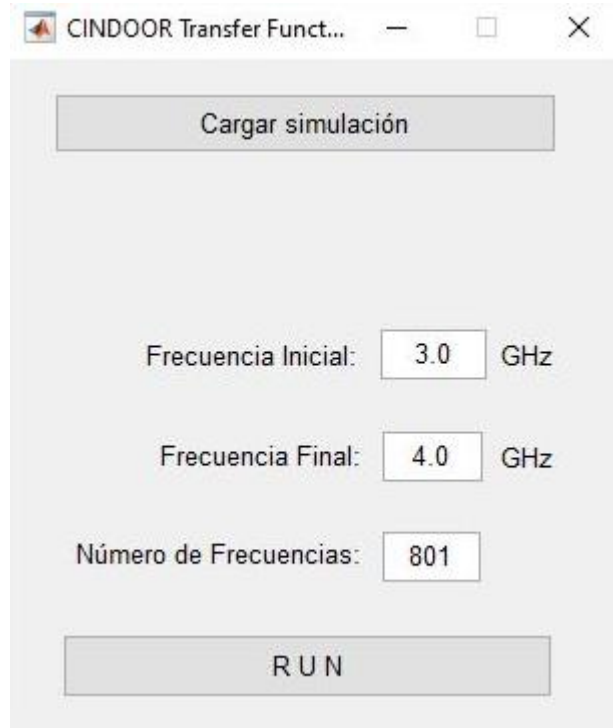


Figura 9. Interfaz de la aplicación dedicada a calcular la función de transferencia.

En ella, se selecciona el ancho de banda que se quiere utilizar mediante la frecuencia inicial y final, y el número de tonos que se quiere utilizar. En el caso de este TFG, como la frecuencia central utilizada son 26 GHz, y el ancho de banda es de 500 MHz, la frecuencia inicial será de 25.750 GHz y la frecuencia final será de 26.250 GHz. En cuanto al número de tonos, como en el estándar 5G se recoge que la separación entre tonos debe de ser de 60 KHz, se van a utilizar 8334 tonos. Esto se debe a la siguiente ecuación:

$$N^{\circ}tonos = \frac{500 * 10^6}{60 * 10^3} \approx 8334 \text{ tonos} \quad (3.6)$$

Donde el numerador corresponde al ancho de banda utilizado, que se ha comentado antes, y el denominador corresponde a la separación entre tonos.

Para obtener la función de transferencia desde el marco teórico, primero se tiene que conseguir la respuesta al impulso. En el caso de CINDOOR, mediante el trazado de rayos, se puede lograr a través de la siguiente fórmula:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N a_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (3.7)$$

Donde N es el número de rayos y a_i es el voltaje inducido por cada uno de estos rayos. Como se ha explicado en el capítulo anterior, para calcular la capacidad en (2.12), la respuesta impulsiva se tiene que pasar al dominio de la frecuencia. Por lo tanto, para obtener la función de transferencia hay que aplicar la transformada de Fourier (FFT).

$$H(f) = \mathcal{F}\{h(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N a_i \delta(\tau - \tau_i) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \sum_{i=1}^N a_i e^{-j2\pi f\tau_i} \quad (3.8)$$

Una vez obtenida la función de transferencia $H(f)$, se ha obtenido la CDF de la capacidad. Para ello, se ha vuelto a la ventana expuesta en la Figura 8, y se ha seleccionado la opción capacidad. A continuación, se abre la ventana que se puede observar en la Figura 10. En ella, se puede seleccionar el número de transmisores que quieres incluir en la obtención de la CDF de la capacidad suma o en la capacidad en función del valor de la SNR. También se puede seleccionar el tipo de normalización deseada, las cuales están explicadas en la sección 2.2 del capítulo anterior. Por un lado, se tiene la normalización de usuario, que implica control de la potencia, y por el otro lado tenemos la normalización global, en la que no lo implica.

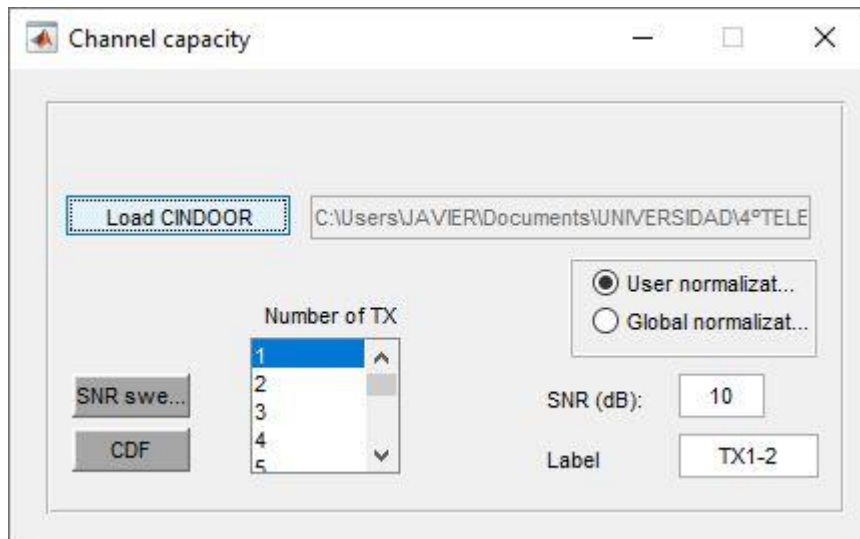


Figura 10. Interfaz de la aplicación dedicada al cálculo de la capacidad.

Por último, hay una opción que permite seleccionar la SNR en decibelios que se desea utilizar en los cálculos, y otra opción para poner un título a la gráfica.

Una vez seleccionados todos los parámetros, se obtienen las gráficas que se van a mostrar en el siguiente capítulo. En la Figura 11 se ofrece un ejemplo de la CDF de la capacidad para un solo transmisor utilizado.

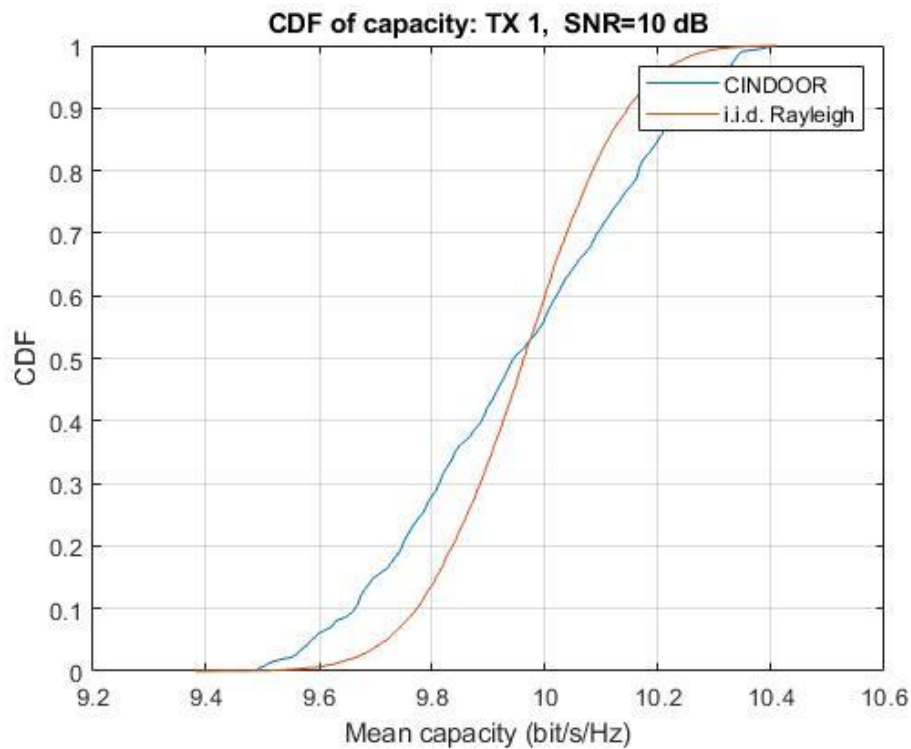


Figura 11. CDF de la capacidad, comparando CINDOOR y un canal de tipo Rayleigh.

Como se puede observar, los cálculos de la CDF de la capacidad de canal obtenidos de MATLAB, de color azul, se comparan con la CDF de la capacidad de canal asociada a un canal que sigue una distribución de tipo Rayleigh.

Capítulo 4. Resultados

En el cuarto capítulo de este trabajo se va a realizar un análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con CINDOOR, a través de gráficas y tablas que clarifiquen los resultados. Para ello, primero se hablará sobre el escenario en el que se han realizado estas simulaciones. A continuación, se comentará la configuración utilizada para realizar estas simulaciones, como puede ser los tipos de antena utilizados, el ancho de pulso, etc. Finalmente, se mostrarán los resultados obtenidos, comparando el uso del MIMO distribuido y el MIMO concentrado para ese mismo escenario, y se expondrán unas conclusiones en base a estos resultados.

Este capítulo está dividido en tres partes diferentes. En la primera parte se va a comentar el escenario de medida utilizado y sus características más importantes. En la segunda parte, se va a hablar de los parámetros utilizados para realizar las simulaciones, tanto del MIMO concentrado como del MIMO distribuido. En la última parte, se va a comentar,

4.1 Escenario de simulación

El escenario escogido para realizar las simulaciones es la planta 0 del edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Para conocerlo mejor, en la Figura 12 se puede observar el escenario que se va a llevar a estudio.

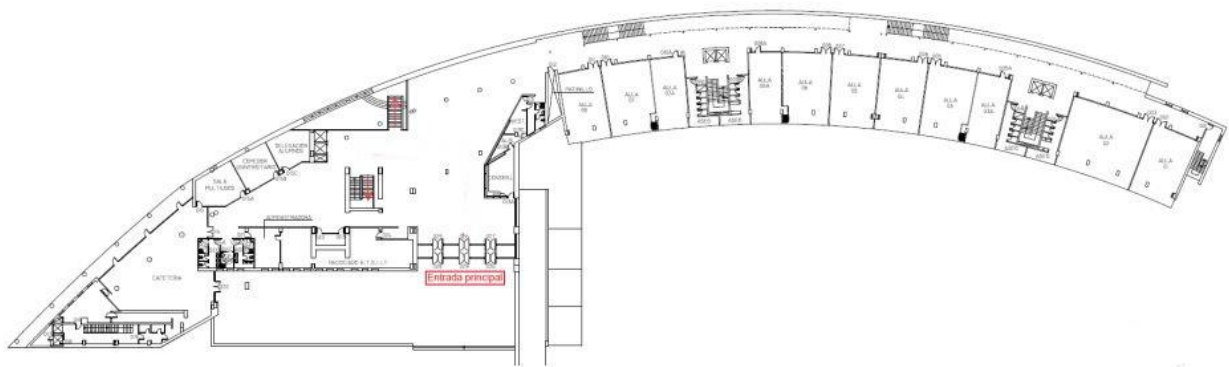


Figura 12. Vista vertical de la planta 0 de la ETSIIT.

Este lugar cuenta con una amplia entrada principal, que es la que se observa en la imagen de la Figura 13. Esta entrada está acompañada de varias escaleras y un ascensor para acceder a las demás plantas del edificio. Además, justo a la derecha de la entrada se encuentra conserjería, y a su izquierda se encuentra secretaria. En la parte izquierda de la planta, se halla la cafetería del edificio, y al lado suya, unos baños. Además, en la parte izquierda también se localizan varias aulas pequeñas para diferentes usos. Por último, en la parte derecha respecto de la entrada, se ubica un largo pasillo curvo, el cual se puede observar en la Figura 14. En él se encuentran ocho grandes aulas en las que se imparte clase, además de varias escaleras y dos ascensores y baños.



Figura 13. Vista frontal de la entrada de la ETSIT.



Figura 14. Vista frontal del pasillo derecho de la planta 0 de la ETSIIT.

Para realizar las simulaciones en CINDOOR, el grupo GISAR ha elaborado previamente el modelo del escenario propuesto que se puede ver en la Figura 15.

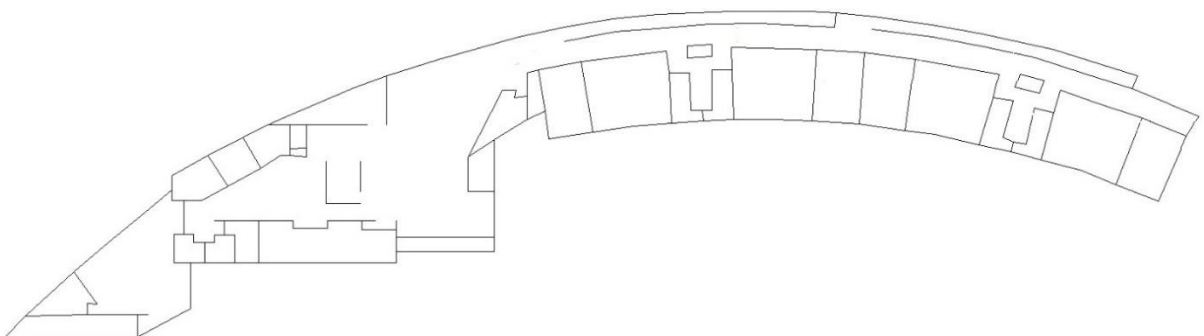


Figura 15. Modelo del escenario utilizado en CINDOOR.

Este modelo está formado por 180 placas, con distintas propiedades electromagnéticas dependiendo del material al que estén representando, ya que la planta 0 de este edificio contiene diferentes materiales como son el ladrillo, el hormigón, el metal y el cristal. Además, trabajar a la frecuencia de 26 GHz también influye en las propiedades electromagnéticas. Para obtener estas propiedades para cada material, se ha utilizado las dos siguientes formulas [18]:

$$\eta' = a f^b \quad (4.1)$$

$$\sigma = c f^d \quad (4.2)$$

Siendo η' la permitividad relativa, σ la conductividad, f la frecuencia y a , b , c , d constantes dependientes de cada material.

Como se puede observar, se analizará un escenario muy grande y complejo, y, por lo tanto, una campaña de medidas resultaría bastante costosa. Por ello, se realizará un análisis de los resultados obtenidos por las simulaciones en CINDOOR.

4.2 Parámetros básicos de las simulaciones

En cuanto a la configuración escogida para la realización de este proyecto, la frecuencia a la que se han realizado las simulaciones ha sido de 26 GHz, ya que es una banda considerada en el estándar 5G, como se explica en el apartado 1.2. Además, se ha utilizado un ancho de banda de 500 MHz. Como se ha explicado en el apartado 3.3, se van a utilizar 8334 tonos, ya que el estándar 5G se recoge que una de las posibles separaciones entre tonos es de 60 KHz. El estudio que se ha realizado en este trabajo se ha centrado en el enlace ascendente, y para el entorno presentado en la Figura 15 se han establecido 20 emplazamientos diferentes para los transmisores, intentando que las posiciones fijadas para estos estén lo más repartidas posibles en el escenario de trabajo, tal y como se recoge en la Figura 16. Los 20 transmisores se han colocado a una altura de 1.50 metros sobre el suelo, simulando un terminal de un usuario a pie. En la Tabla 1, se comenta las coordenadas x , y , z , utilizadas para cada transmisor. El origen de coordenadas respecto al cual se configura la tabla mencionada se sitúa en la esquina inferior izquierda de la Figura 15.

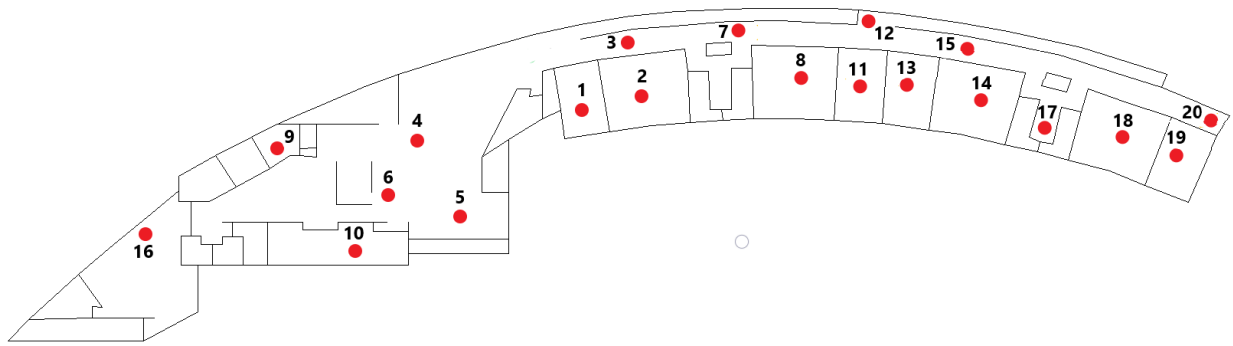


Figura 16. Posición de los transmisores en el modelo de CINDOOR para realizar las simulaciones.

Transmisores	Posición X	Posición Y	Posición Z
Tx 1	90.4	69.8	1.5
Tx 2	99.8	71.7	1.5
Tx 3	102.7	80.1	1.5
Tx 4	66.4	63.4	1.5
Tx 5	70.7	53.1	1.5
Tx 6	61.2	56.2	1.5
Tx 7	114.3	81	1.5
Tx 8	123.4	72.3	1.5
Tx 9	44.5	62.7	1.5
Tx 10	53.5	48	1.5
Tx 11	131.4	72.3	1.5
Tx 12	134	82.3	1.5
Tx 13	139.1	71.1	1.5
Tx 14	149	70.7	1.5
Tx 15	150.7	77.8	1.5
Tx 16	23	46.3	1.5
Tx 17	159.5	66.6	1.5
Tx 18	169.6	65.1	1.5
Tx 19	181	60	1.5
Tx 20	183.6	67.6	1.5

Tabla 1. Coordenadas de la posición de los transmisores en el modelo de CINDOOR

Por otro lado, en el receptor, que representa la estación base, tanto para el análisis de MIMO distribuido como para MIMO concentrado se ha utilizado un array con un total de 100 antenas.

En cuanto al trazado de rayos de las simulaciones, se ha considerado el rayo directo, la primera difracción, y las cuatro primeras reflexiones, ya que, aunque se considerasen más difracciones o reflexiones, prácticamente no altera los resultados obtenidos. Sin embargo, sí alteraría bastante el tiempo de cada simulación. Aun solo utilizando hasta la cuarta reflexión, el tiempo de simulación de cada enlace ocupa alrededor de 18 horas para completarse. Para todas las representaciones mostradas en este estudio, se ha utilizado una relación señal a ruido de 10 dB, y además se ha optado por utilizar la normalización de usuario explicada en el apartado 2.2.2.

Hay parámetros de la configuración que han sido diferentes dependiendo de si se estaba utilizando MIMO distribuido o MIMO concentrado, por lo tanto, se ha dividido en dos apartados diferentes.

4.2.1 MIMO distribuido

En la configuración del enlace utilizando MIMO distribuido, se han colocado las 100 antenas receptoras repartidas por toda la planta del edificio, como se muestra en la Figura 17.

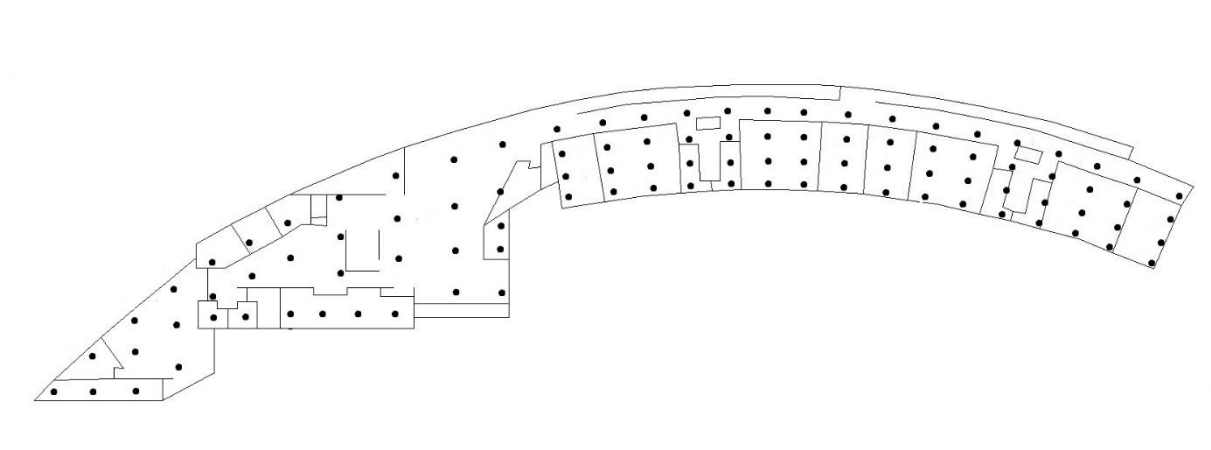


Figura 17. Posición de los transmisores en el modelo de CINDOOR para realizar las simulaciones de MIMO distribuido.

Como se puede observar, se han utilizado 64 de las 100 antenas disponibles en la parte derecha de la planta. Esto es debido a que en esa zona es donde se concentran las aulas donde se imparten las clases universitarias, por lo que probablemente el tráfico será mayor, y de esta forma se obtendrá mejores prestaciones para estos usuarios. Las restantes 32 antenas, se han repartido de forma que se abarque todas las salas de la planta.

Otro punto para tratar es el tipo de antena utilizado tanto en el transmisor como en el receptor. En cuanto al transmisor, se ha utilizado como antena un dipolo $\lambda/2$ para cada una de las 20 antenas utilizadas. En cambio, en las antenas receptoras se ha utilizado la antena HyperLink HG35805CUPR-NF.

Como se ha dicho en el apartado 4.2, las antenas transmisoras están dispuestas en el entorno de CINDOOR a 1.5 metros sobre el suelo. Sin embargo, las antenas receptoras se han situado a una altura de 2.8 metros. Esto se debe a que las antenas estarían colocadas en el techo de la planta, y en este caso el techo tiene una altura de 3 metros sobre el suelo.

4.2.2 MIMO concentrado

En el caso del MIMO concentrado, la disposición de las 100 antenas receptoras se ha colocado conjuntamente en un array rectangular de 10x10, con una separación entre elementos de 0.536λ . La estación base se ha colocado en una posición céntrica, como se puede observar en la Figura 18, con el objetivo de dar cobertura a toda la planta. Su posición exacta se puede ver en la Tabla 2, en la que se puede comparar con la posición de los transmisores.

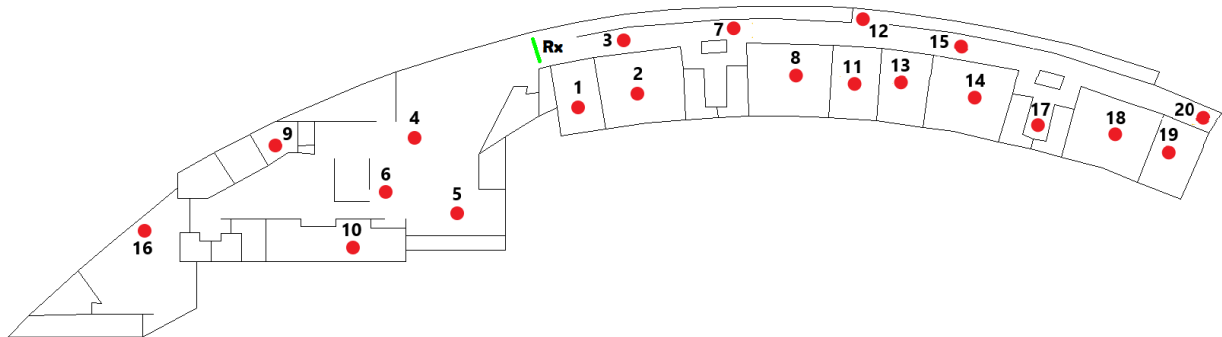


Figura 18. Posición de los transmisores y la estación base en el modelo de CINDOOR para realizar las simulaciones de MIMO concentrado. La línea verde representa un array de 100 antenas de la estación base.

	Posición X	Posición Y	Posición Z	Distancia a Rx
Receptor	83.33	77.5	2.5	0
Tx 1	90.4	69.8	1.5	10.5
Tx 2	99.8	71.7	1.5	17.49
Tx 3	102.7	80.1	1.5	19.57
Tx 4	66.4	63.4	1.5	22.06
Tx 5	70.7	53.1	1.5	27.49
Tx 6	61.2	56.2	1.5	30.73
Tx 7	114.3	81	1.5	31.18
Tx 8	123.4	72.3	1.5	40.42
Tx 9	44.5	62.7	1.5	41.55
Tx 10	53.5	48	1.5	41.97
Tx 11	131.4	72.3	1.5	48.36
Tx 12	134	82.3	1.5	50.91
Tx 13	139.1	71.1	1.5	56.15
Tx 14	149	70.7	1.5	66.03
Tx 15	150.7	77.8	1.5	67.37
Tx 16	23	46.3	1.5	67.93
Tx 17	159.5	66.6	1.5	76.95
Tx 18	169.6	65.1	1.5	87.16
Tx 19	181	60	1.5	99.16
Tx 20	183.6	67.6	1.5	100.76

Tabla 2. *Coordenadas de la posición de la estación base y los transmisores y distancia entre la estación base y cada transmisor en el modelo de CINDOOR.*

Además, en la tabla anterior se ha añadido una columna con la distancia del receptor a cada uno de los transmisores. Como se puede comprobar el número de cada transmisor ha sido ordenado de acuerdo con la distancia que existe con la antena receptora, siendo el transmisor 1 el más cercano, y el transmisor 20 el más lejano desde la posición del receptor. Esta nomenclatura de los transmisores también se ha aplicado para el caso del MIMO distribuido.

El tipo de antena utilizado en el caso del MIMO concentrado ha sido un dipolo $\lambda/2$ tanto para el receptor como para el transmisor.

4.3 Análisis de la capacidad obtenida

4.3.1 Variación de la capacidad frente al número de usuarios activos

Una vez explicado los sistemas empleados para la caracterización del canal radio de este trabajo en capítulos anteriores, y presentado el entorno de medida utilizado y la configuración escogida para realizar las simulaciones, se va a presentar los resultados obtenidos a partir de las simulaciones en la herramienta CINDOOR. Hay que resaltar que en todas las gráficas expuestas en esta sección se ha considerado una relación señal a ruido de 10 dB en todo el enlace.

En las gráficas que se presentan a continuación se ha querido comparar dos variantes de la tecnología MIMO masivo: el MIMO concentrado y el MIMO distribuido. Para ello, se han realizado comparaciones para 5, 10, 14 y 20 usuarios activos.

En el caso de los 5 y los 10 usuarios activos, se han comparado los resultados en dos situaciones diferentes. Por un lado, en la primera situación se han escogido usuarios activos que estuviesen próximos entre sí. Sin embargo, en el segundo caso se han escogido usuarios activos que estuviesen lejos entre sí. Estos casos se han realizado con el objetivo de poder hacer una comparación de las CDF de la capacidad suma entre los dos casos, y así poder sacar conclusiones de los resultados obtenidos.

En primer lugar, se va a mostrar los resultados obtenidos para el caso en el que existen 5 usuarios activos. En concreto, para el caso en el que los 5 usuarios activos se encuentran cerca entre sí. Para este caso, se ha escogido los transmisores 11, 12, 13, 14 y 15 de la Figura 16 (la que solo muestra los transmisores.) En la Figura 19 se puede observar con más claridad los transmisores escogidos para este caso.

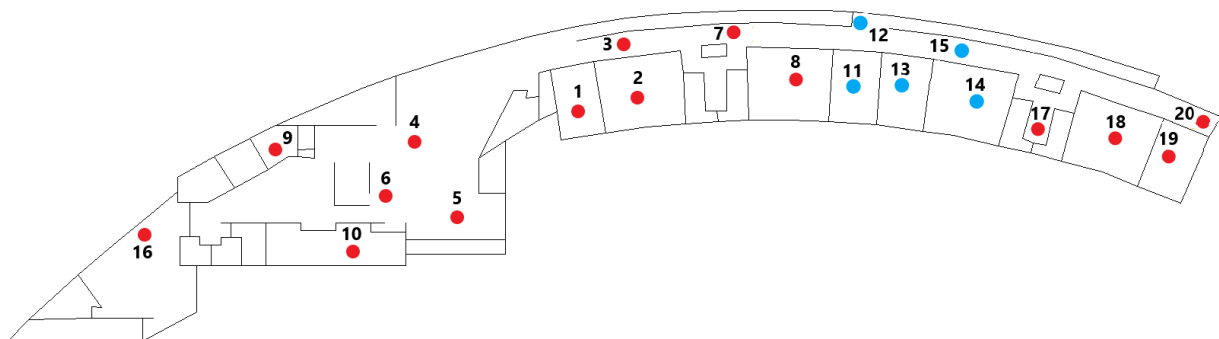


Figura 19. Posición de los 5 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran juntos.

Los transmisores de color azul son los que se han utilizado para este caso. Como resultado, se ha obtenido la siguiente gráfica que se aprecia en la Figura 20.

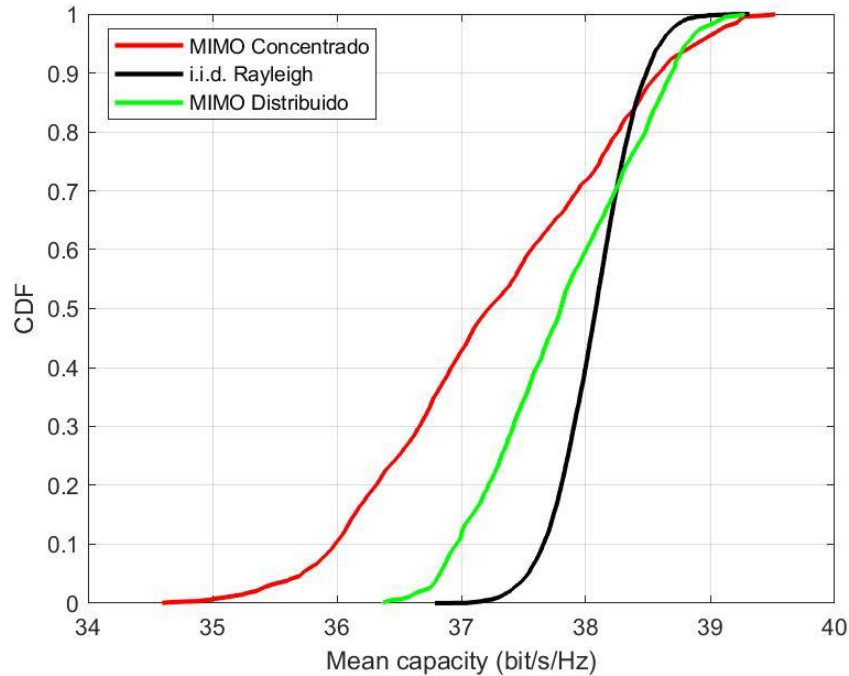


Figura 20. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 5 transmisores juntos.

En la figura anterior, como en todos los resultados, aparece la CDF de la capacidad para un canal de tipo Rayleigh que sirve como referencia para el análisis de los resultados obtenidos. Para cada caso, se ha realizado una tabla en la que se indica algunos parámetros de la CDF del MIMO concentrado y MIMO distribuido de la gráfica correspondiente, como son la mediana, el outage al 10% y el porcentaje de pérdida de capacidad respecto de la CDF del canal de tipo Rayleigh. En este primer caso, se pueden observar estos parámetros en la Tabla 3.

5 transmisores Juntos	Mediana (bit/s/Hz)	Outage 10% (bit/s/Hz)	Pérdida de capacidad(%)
MIMO Concentrado	37.2	35.99	2.31
MIMO Distribuido	37.8	36.96	0.73

Tabla 3. Parámetros de la Figura 20.

Como se puede observar en la gráfica y la tabla anterior, la diferencia entre MIMO concentrado y MIMO distribuido para este caso es pequeña, pero con una diferencia de solo 0.6 bit/s/Hz para el valor mediano de capacidad.

Para el caso en el que los 5 usuarios activos se encuentran separados entre sí, se han escogido los transmisores 2, 8, 12, 16 y 20, que aparecen en azul en la Figura 21.

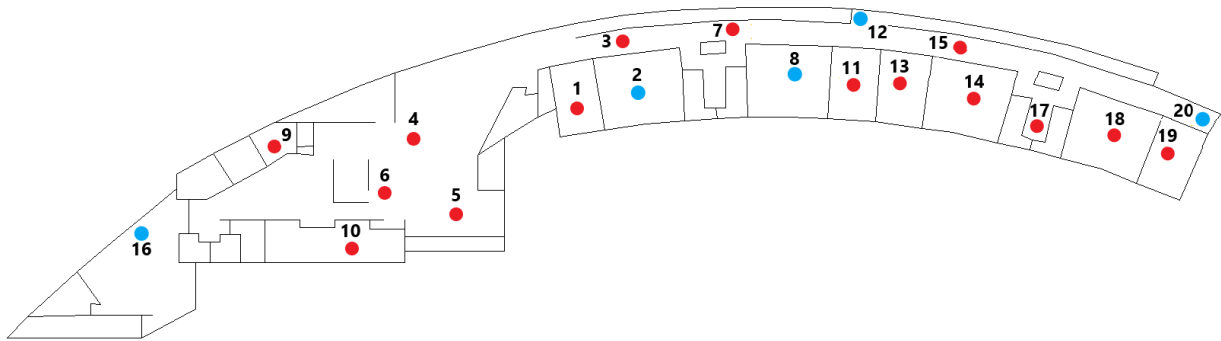


Figura 21. Posición de los 5 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran separados.

Como resultado a este caso, se puede observar las CDF de la capacidad en la Figura 22, junto con la Tabla 4, correspondiente a los parámetros obtenidos de la Figura 22.

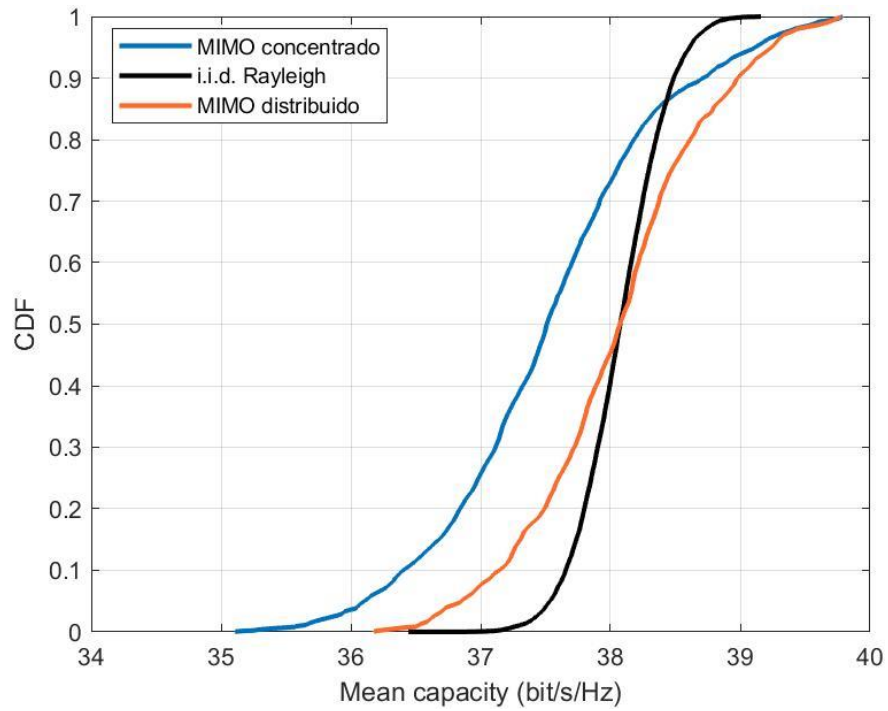


Figura 22. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 5 transmisores separados.

5 transmisores separados	Mediana (bit/s/Hz)	Outage 10% (bit/s/Hz)	Pérdida porcentual de capacidad(%)
MIMO Concentrado	37.51	36.4	1.5
MIMO Distribuido	38.07	37.14	0.03

Tabla 4. Parámetros de la Figura 22.

Al igual que en el caso anterior, existe una ligera ventaja para el caso distribuido, 0.74 bit/s/Hz de aumento en la capacidad mediana.

Para observar mejor las dos gráficas obtenidas a partir del uso de 5 transmisores, se han juntado para poder comparar mejor entre ellas, como se puede ver en la Figura 23.

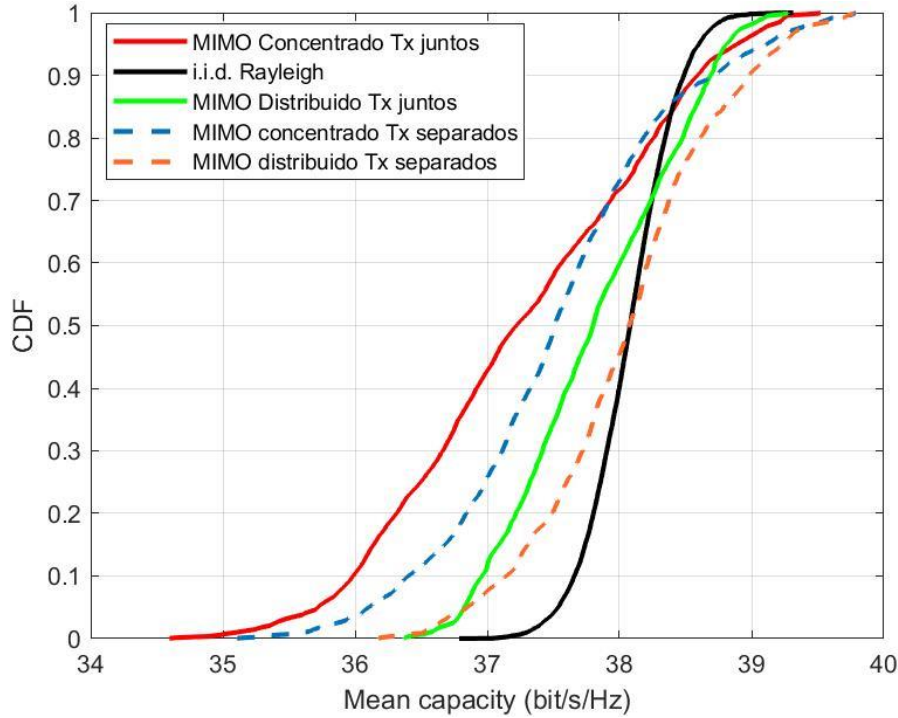


Figura 23. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 5 transmisores activos.

En esta figura se puede observar, además de la curva del canal de tipo Rayleigh, las dos líneas discontinuas correspondientes al MIMO concentrado y al MIMO distribuido utilizando transmisores separados, y las dos líneas continuas correspondientes a la utilización de transmisores juntos entre sí. Como se puede observar, para 5 usuarios activos el uso del MIMO distribuido ofrece una mayor capacidad en comparación con el uso del MIMO concentrado. Además, como era de esperar, cuando los usuarios activos se encuentran juntos entre sí, se obtienen capacidades más bajas, posiblemente por las interferencias que se producen en el multiplexado espacial de esta tecnología.

Para los dos siguientes casos, se han utilizado 10 transmisores, simulando 10 usuarios activos. Como en los casos anteriores, se ha escogido un caso en el que los 10 transmisores se encuentran juntos, y un segundo caso en el que se encuentran separados entre ellos. En este primer caso, se han escogido los transmisores 8, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19 y 20, como se muestra en la Figura 24.

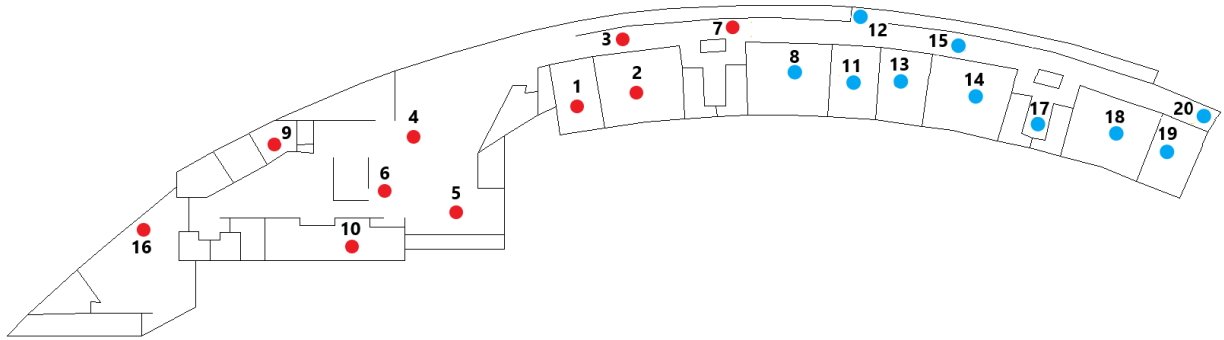


Figura 24. Posición de los 10 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran juntos.

Como resultado, se ha obtenido la Figura 25 de la CDF de la capacidad, junto con la Tabla 5.

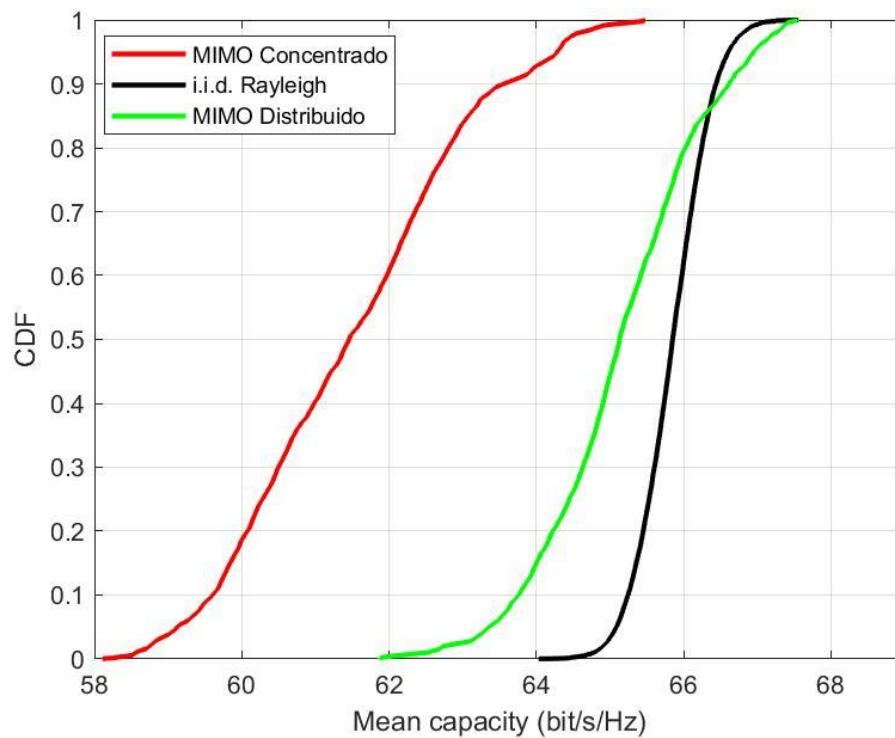


Figura 25. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 10 transmisores juntos.

10 transmisores juntos	Mediana (bit/s/Hz)	Outage 10% (bit/s/Hz)	Pérdida porcentual de capacidad(%)
MIMO Concentrado	61.46	59.61	6.67
MIMO Distribuido	65.13	63.76	1.09

Tabla 5. *Parámetros de la Figura 25.*

En este caso, se puede observar una gran diferencia entre el MIMO concentrado y el MIMO distribuido, obteniendo una diferencia de capacidad de casi 4 bit/s/Hz del MIMO distribuido sobre el MIMO concentrado.

Para el caso en el que se utilizan 10 transmisores activos separados entre sí, se ha escogido los transmisores 1, 3, 4, 8, 10, 12, 15, 16, 17 y 20. La distribución de los transmisores en el escenario escogido es la que se puede ver en azul en la Figura 26.

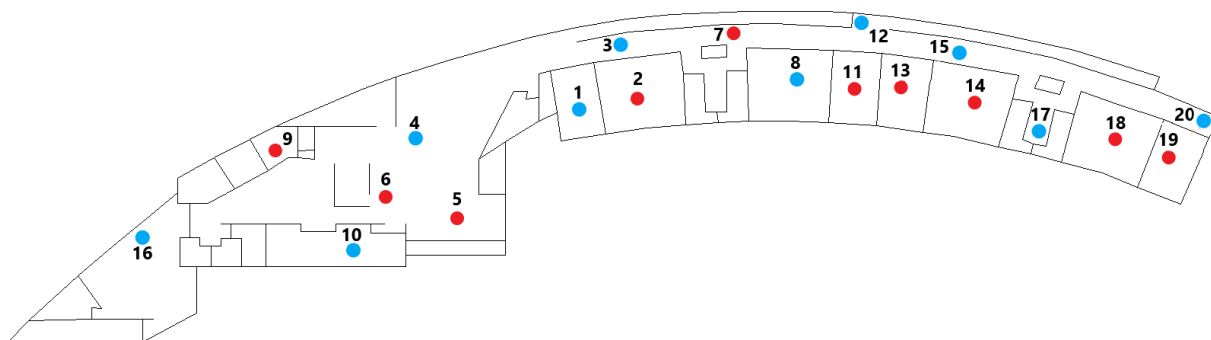


Figura 26. *Posición de los 10 transmisores escogidos para el caso en el que se encuentran separados.*

De esta manera, se ha obtenido la siguiente gráfica, representada en la Figura 27, acompañada de la Tabla 6 con los parámetros de las curvas obtenidas.

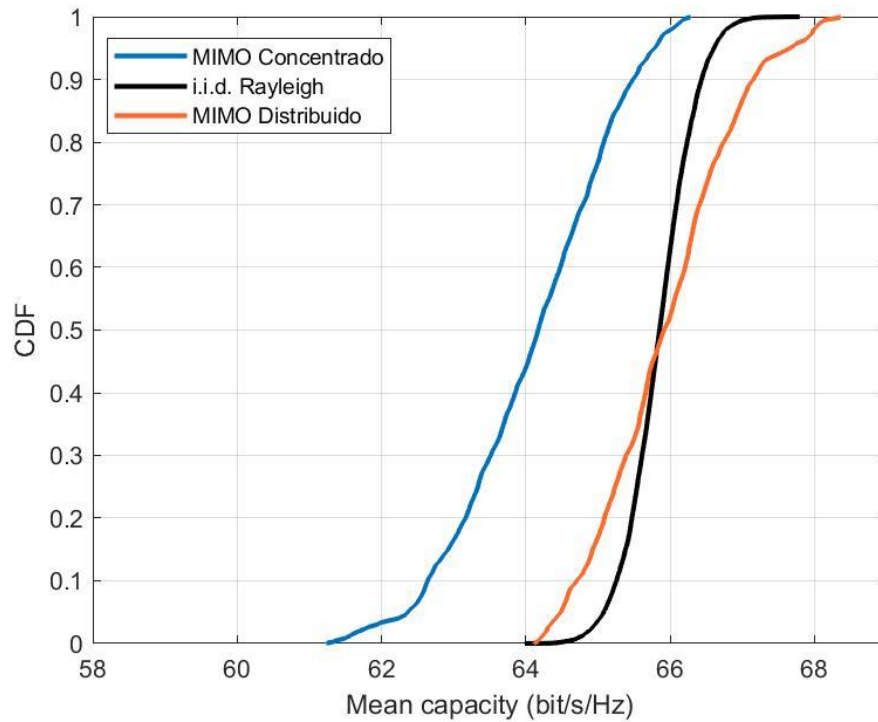


Figura 27. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 10 transmisores separados.

10 transmisores separados	Mediana (bit/s/Hz)	Outage 10% (bit/s/Hz)	Pérdida porcentual de capacidad(%)
MIMO Concentrado	64.17	62.64	2.55
MIMO Distribuido	65.92	64.7	-0.11

Tabla 6. Parámetros de la Figura 27.

En las gráficas obtenidas para 10 usuarios activos, comparándolas con las de 5 usuarios activos, se puede ver como la diferencia de capacidad que se puede llegar a obtener entre el uso de MIMO concentrado y MIMO distribuido aumenta a medida que se incrementa el número de usuarios, siendo el MIMO distribuido el sistema con el que se obtiene una mayor capacidad. Para ser más precisos, en este último caso en el que se utilizan 10 transmisores separados entre sí, hay una diferencia de casi 2 bit/s/Hz. Esta diferencia es menor que la que existe cuando se utilizan 10 transmisores juntos, pero sí que supera a la que hay cuando solo se utilizan 5 transmisores, en los cuales la diferencia entre el MIMO concentrado y el MIMO distribuido no supera el bit/s/Hz.

Como en el caso en el que se simulan 5 usuarios activos, para 10 usuarios activos también se ha realizado una gráfica que combina las CDF de la capacidad del MIMO concentrado y del MIMO distribuido, tanto para la simulación de 10 transmisores juntos, como para la simulación de 10 transmisores separados, como se puede ver en la Figura 28.

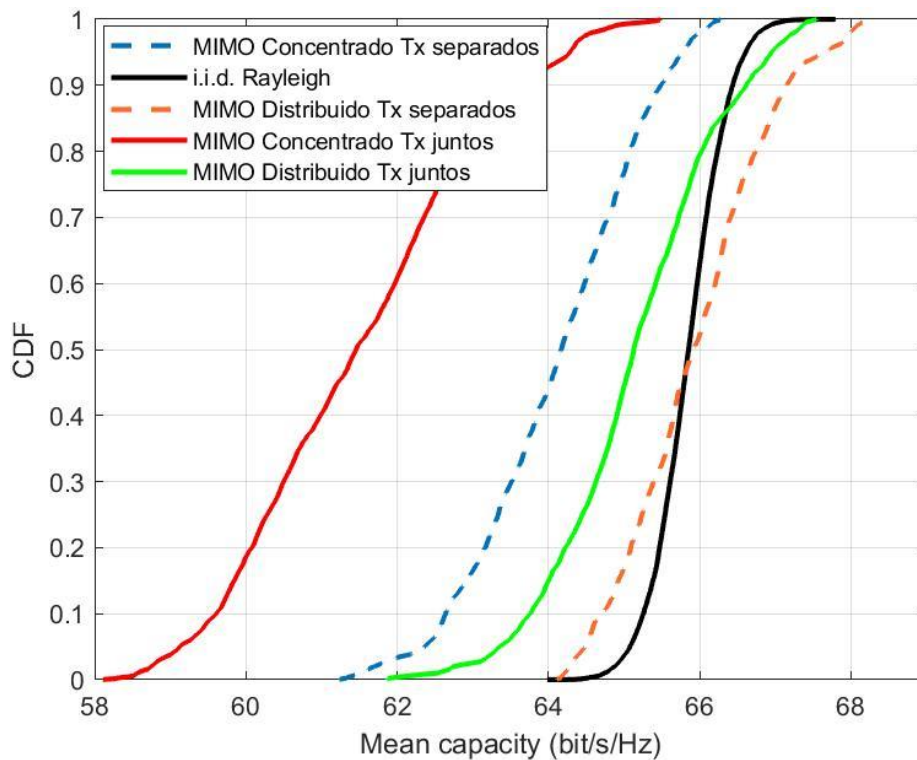


Figura 28. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 10 transmisores activos.

Al igual que pasa con 5 transmisores, observando la gráfica anterior se puede afirmar que con el MIMO distribuido se obtiene una mayor capacidad que con el MIMO concentrado, tanto cuando se simulan usuarios activos separados como cuando se utilizan usuarios activos juntos entre sí. Además, se puede ver como cuando los transmisores están separados entre sí se obtiene una mayor capacidad que cuando se encuentran más juntos.

En esta figura se aprecia mejor que la diferencia de capacidad entre el MIMO distribuido y MIMO concentrado es mayor cuando se utilizan transmisores que están próximos entre sí, ya que, como se ha comentado en el caso anterior, utilizando el MIMO concentrado se produce una mayor interferencia entre antenas, ya que, a diferencia del MIMO distribuido, todas se encuentran en la misma posición aproximadamente.

En el siguiente caso, se ha utilizado 14 transmisores. Para ser más específicos, se ha utilizado los transmisores número 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 19 y 20. A diferencia

de los casos anteriores, solo se ha realizado un suceso para este número de transmisores utilizados. En la Figura 29 se puede observar los 14 transmisores que se han escogido en esta ocasión, de color azul.

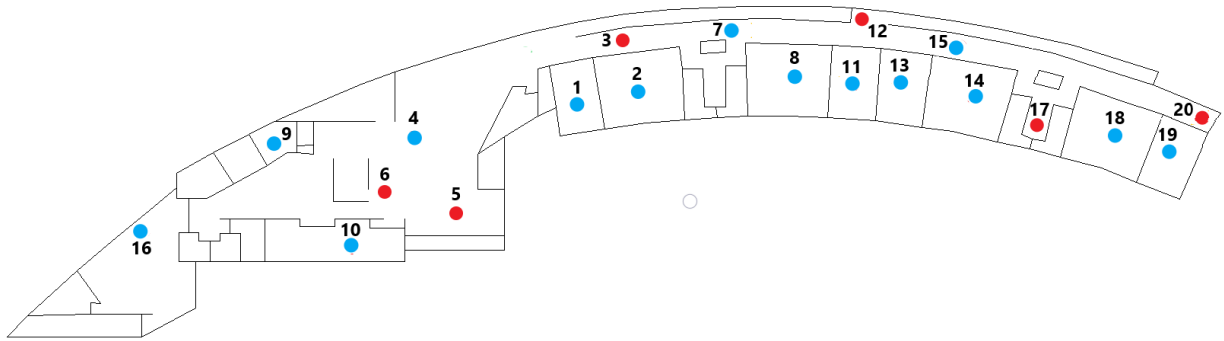


Figura 29. Posición de los 14 transmisores escogidos.

Como resultados para este caso, se ha obtenido la Figura 30 acompañada de la Tabla 7 con varios parámetros estadísticos de la gráfica.

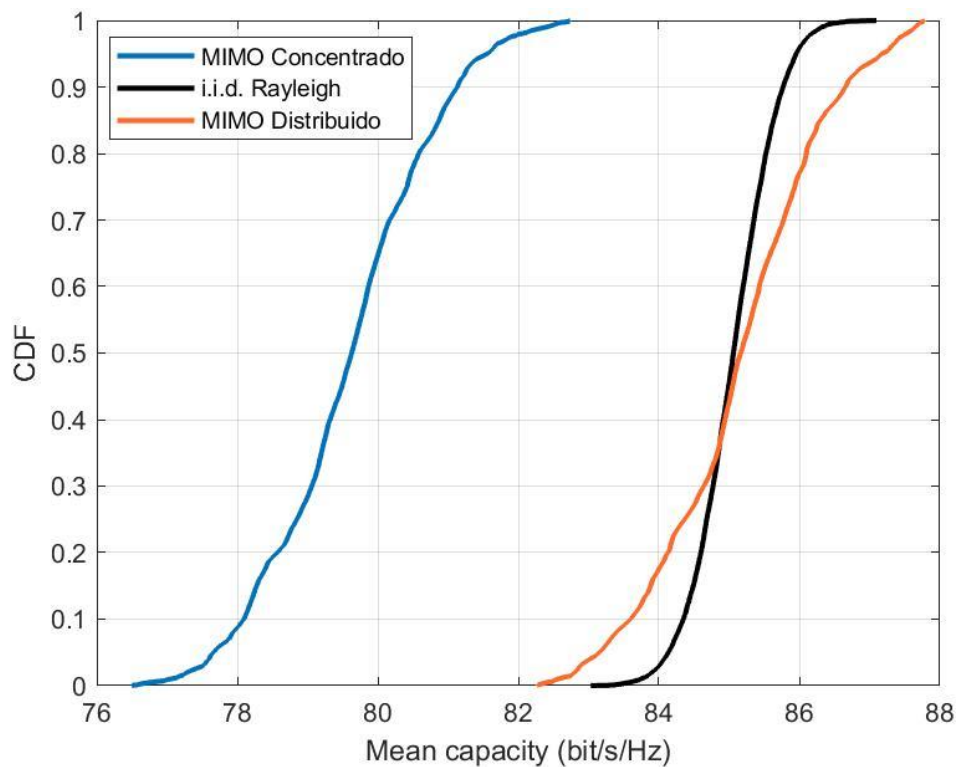


Figura 30. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 14 transmisores.

14 transmisores	Mediana (bit/s/Hz)	Outage 10% (bit/s/Hz)	Pérdida porcentual de capacidad(%)
MIMO Concentrado	79.63	78.1	6.38
MIMO Distribuido	85.17	83.6	-0.13

Tabla 7. *Parámetros de la Figura 30.*

Como se puede observar en la Figura 30, la diferencia de capacidad entre el MIMO concentrado y el MIMO distribuido es cada vez mayor a medida que se aumenta el número de usuarios activos conectados a la red. En este caso, la diferencia alcanza casi los 6 bit/s/Hz. Además, la capacidad alcanzada por el MIMO distribuido llega a superar, como se puede observar en la gráfica anterior, a la capacidad alcanzada por el canal de tipo Rayleigh.

En el último caso, se han utilizado los 20 transmisores disponibles simulando 20 usuarios activos. La gráfica resultante se puede observar en la Figura 31, acompañada de la Tabla 8 correspondiente.

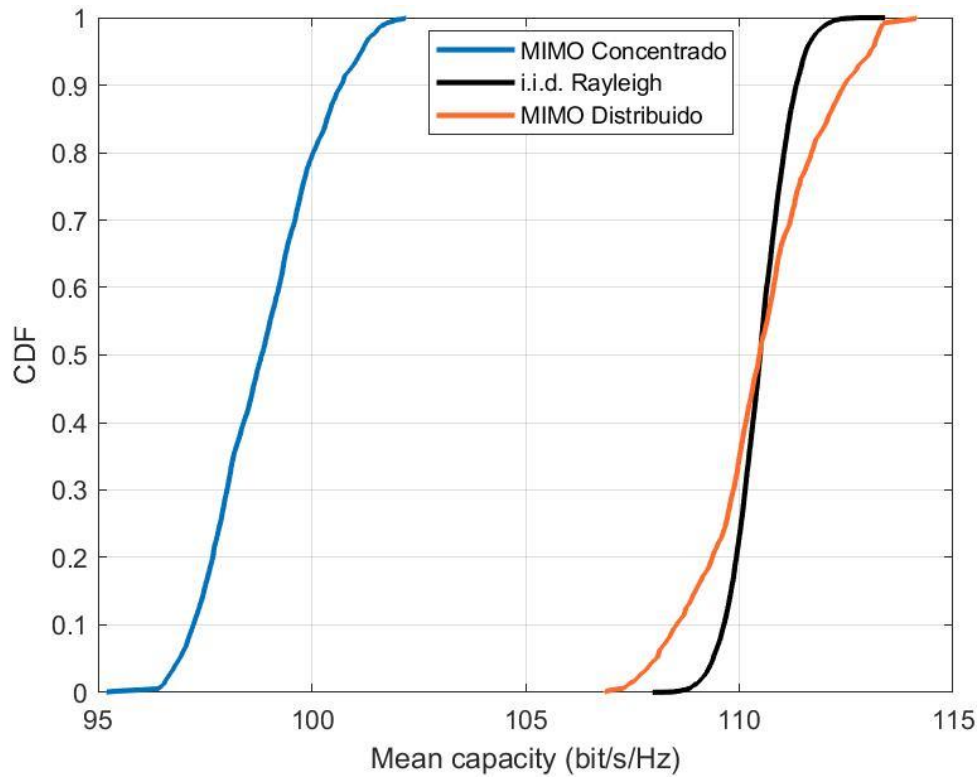


Figura 31. CDF de la capacidad en el caso en el que se encuentran 20 transmisores.

20 transmisores	Mediana (bit/s/Hz)	Outage 10% (bit/s/Hz)	Pérdida porcentual de capacidad(%)
MIMO Concentrado	98.83	97.23	10.56
MIMO Distribuido	110.5	108.5	0

Tabla 8. Parámetros de la Figura 31.

Como se ha visto en todas las gráficas dibujadas hasta ahora, a medida que se aumenta el número de usuarios activos conectados a la red, la diferencia de ganancia de capacidad entre el MIMO concentrado y el MIMO distribuido se hace más grande. Como era de esperar, en este caso, al utilizar los 20 transmisores, esta diferencia es la más grande en comparación con las anteriores, llegando a una diferencia de capacidad de casi 12 bit/s/Hz. Por otro lado, al igual que en el caso anterior, la CDF de la capacidad del MIMO distribuido se asemeja bastante a la CDF de la capacidad del canal de tipo Rayleigh.

4.3.2 Análisis de la influencia de la proximidad de los usuarios en la capacidad alcanzable

Tras las simulaciones comentadas anteriormente, se ha realizado un último experimento, en el que se compara la CDF de la capacidad suma entre dos usuarios activos próximos entre sí y dos usuarios activos más separados. Esto provoca que los canales sean más parecidos como en el primer caso, o más diferentes en el caso del segundo, y, por lo tanto, la CDF será diferente. Para este experimento, se han cogido varios ejemplos según si existe línea de visión directa (LOS) o no hay línea de visión directa (NLOS) con la estación base, y se ha realizado tanto para MIMO concentrado como para MIMO distribuido para comparar los resultados obtenidos.

En primer lugar, se ha realizado las simulaciones para el caso LOS. Para ello, se ha calculado la CDF de la capacidad suma para el transmisor 7 con un nuevo transmisor que se llamara 7', situado a una λ del nombrado en primer lugar. Esta CDF se va a comparar con la obtenida a partir de los transmisores 7 y 12. La comparación realizada se puede observar tanto en la Figura 32, en la que se utiliza el MIMO concentrado, como en la Figura 33, en la que se utiliza el MIMO distribuido.

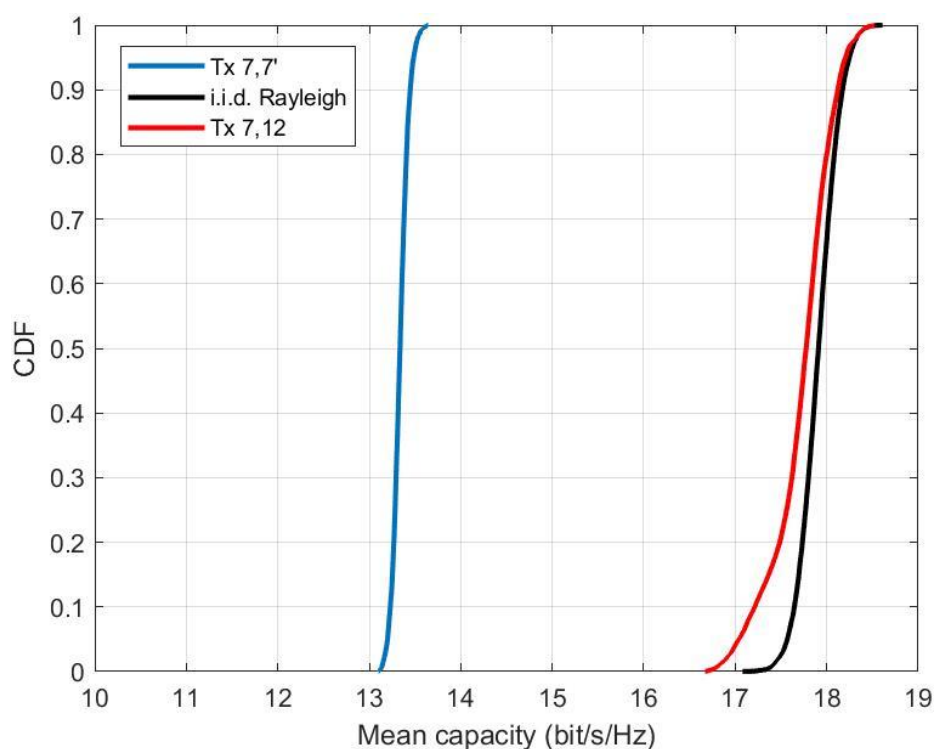


Figura 32. CDF de la capacidad de los transmisores 7 y 7', y 7 y 12, utilizando el MIMO concentrado.

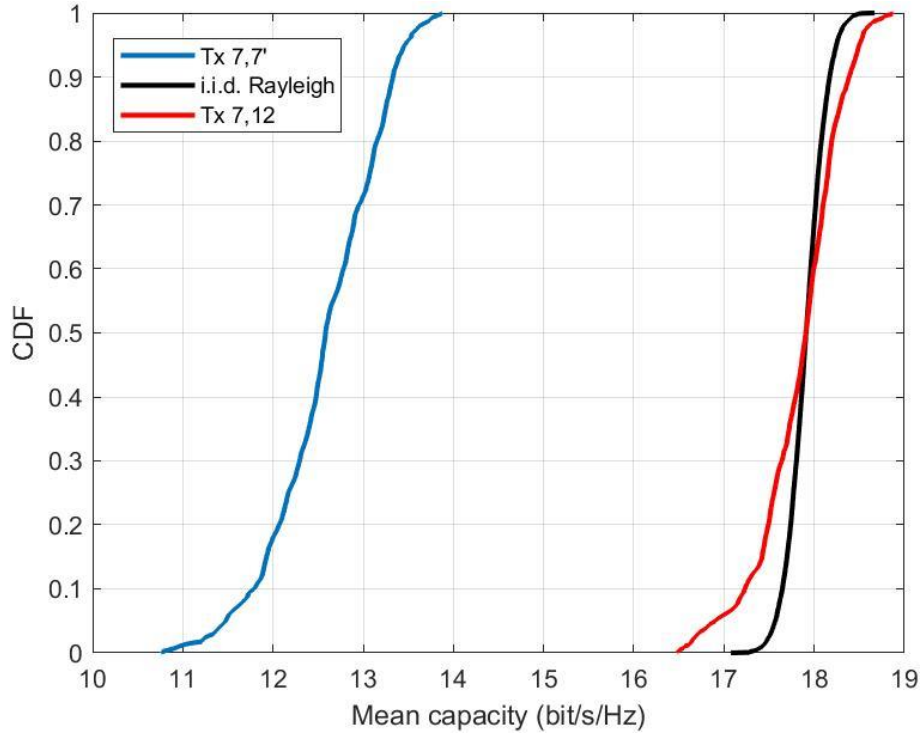


Figura 33. CDF de la capacidad de los transmisores 7 y 7', y 7 y 12, utilizando el MIMO distribuido.

Como se puede observar en las gráficas, la capacidad suma de los transmisores activos que se encuentran juntos es mucho menor que en transmisores algo más separados. Esto se debe a que al estar más juntos los usuarios activos, los canales se van a parecer más entre sí, y por lo tanto va a existir una mayor interferencia entre ellos. Además, se puede ver que la diferencia es algo mayor en el MIMO distribuido, llegando a diferencias de capacidad de 5 bit/s/Hz aproximadamente.

Como el ejemplo anterior se ha realizado en transmisores que estaban en un pasillo estrecho, se ha comparado con otro ejemplo LOS para ver si influye el escenario donde se encuentran. Para este segundo ejemplo se ha utilizado el transmisor 4 y el 6, y un transmisor situado a una λ del transmisor 4, al que llamaremos 4'. En la Figura 34 se puede observar las CDF de la capacidad en el caso en el que se utiliza el MIMO concentrado. Por otro lado, en la Figura 35 se encuentra para el caso en el que se utiliza el MIMO distribuido.

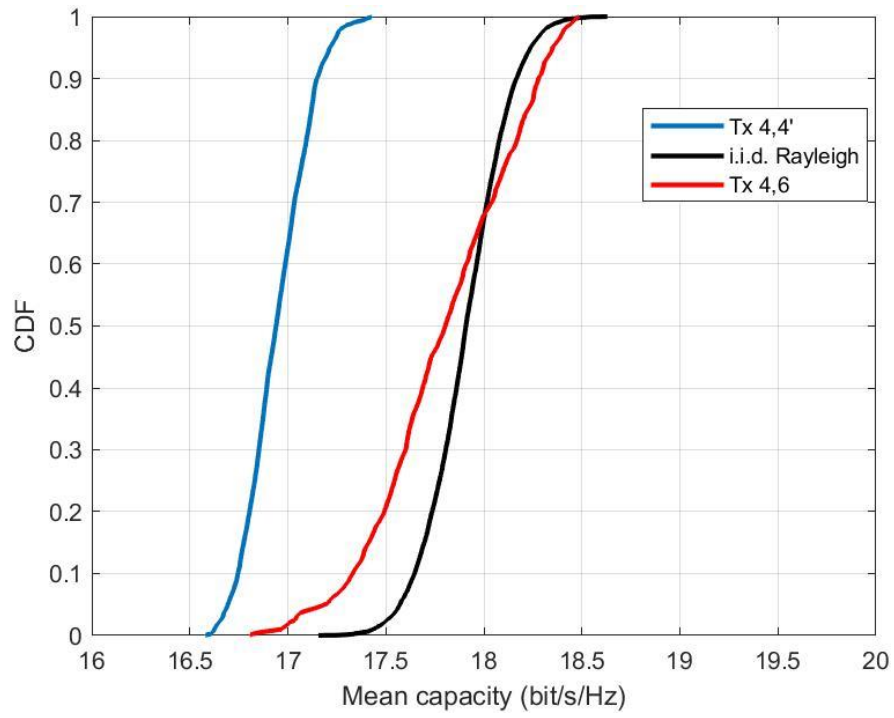


Figura 34. CDF de la capacidad de los transmisores 4 y 4', y 4 y 6, utilizando el MIMO concentrado.

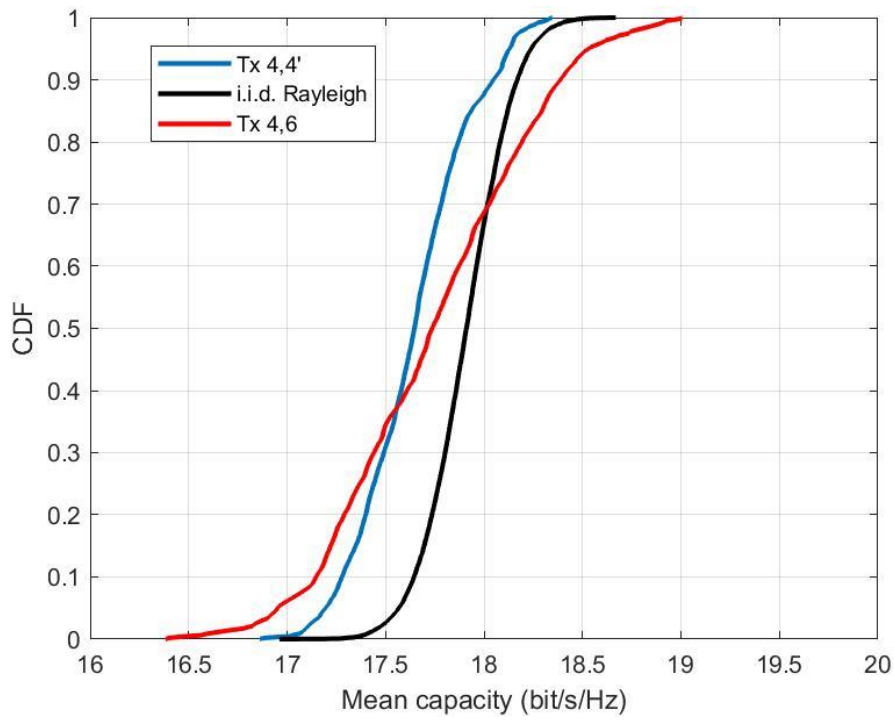


Figura 35. CDF de la capacidad de los transmisores 4 y 4', y 4 y 6, utilizando el MIMO distribuido.

En este caso ocurre lo mismo que en el caso anterior. Sin embargo, en este caso la capacidad para los transmisores que se encuentran cerca entre sí es mayor que en el anterior caso, con diferencias de más de 3 bits/s/Hz. Esto es debido a que, en el primer caso, los transmisores se encuentran en un pasillo no muy ancho, y esto puede tener como consecuencia que hay una especie de simetría en las reflexiones de las ondas, y sus canales se parezcan aún más que en otros casos, y, por lo tanto, se pierda capacidad.

En el siguiente caso, se han escogido transmisores de tipo NLOS para realizar las simulaciones. En concreto, se ha utilizado el transmisor 5 con el transmisor 10 y un transmisor denominado 5', que al igual que en los casos anteriores se encuentra a una λ del transmisor 5 inicial. En la Figura 36 y en la Figura 37 se puede observar los casos para el MIMO concentrado y el MIMO distribuido respectivamente.

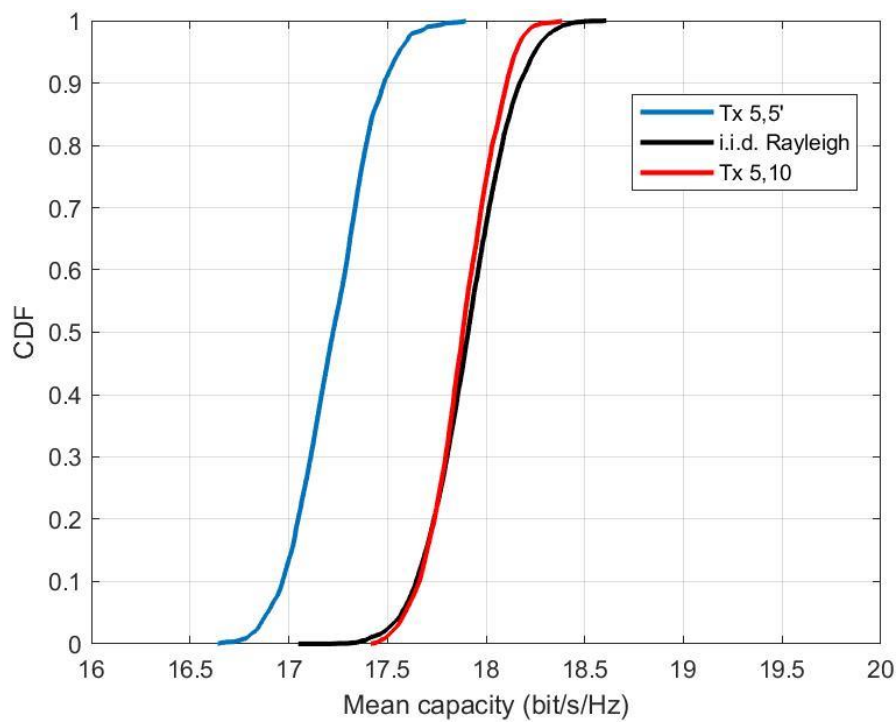


Figura 36. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 10, utilizando el MIMO concentrado.

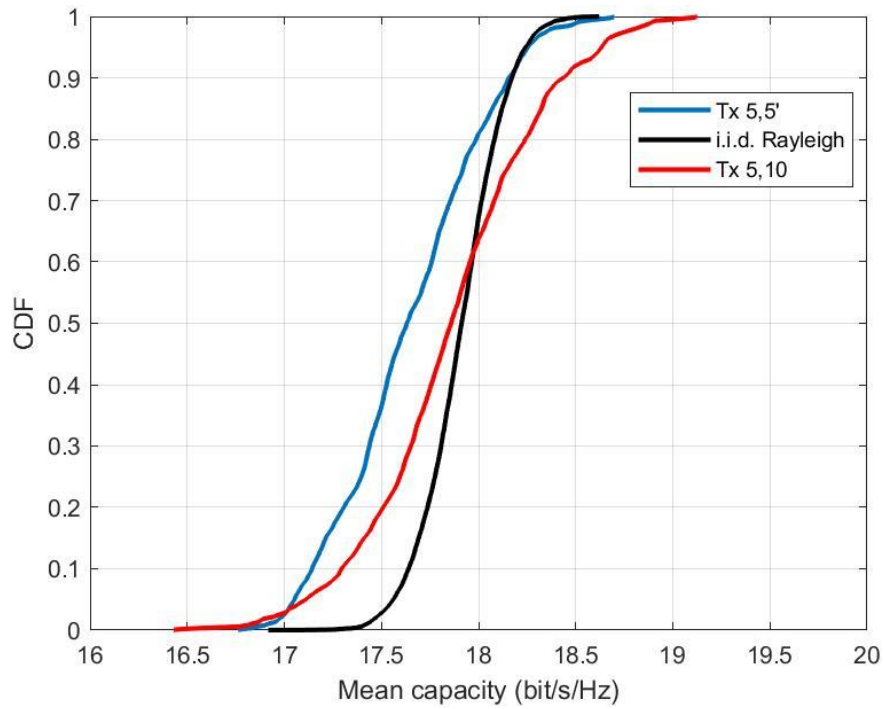


Figura 37. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 10, utilizando el MIMO distribuido.

Comparando este caso con el caso LOS anterior no se encuentran muchas diferencias. En cuanto la capacidad obtenida en este caso, comparando estas dos últimas gráficas, se puede comprobar que en el caso del MIMO distribuido se alcanza una mayor capacidad.

En el último caso, se ha escogido un transmisor LOS y otro NLOS para comparar con el resto de los experimentos. Para ello, se ha escogido el transmisor 6, de tipo LOS, y el transmisor 5, de tipo NLOS. Como en los casos anteriores, se ha simulado un transmisor 5', situado a una λ del transmisor 5. En la Figura 38 se encuentra la gráfica para el caso del MIMO concentrado, y en la Figura 39, por otro lado, para el caso del MIMO distribuido.

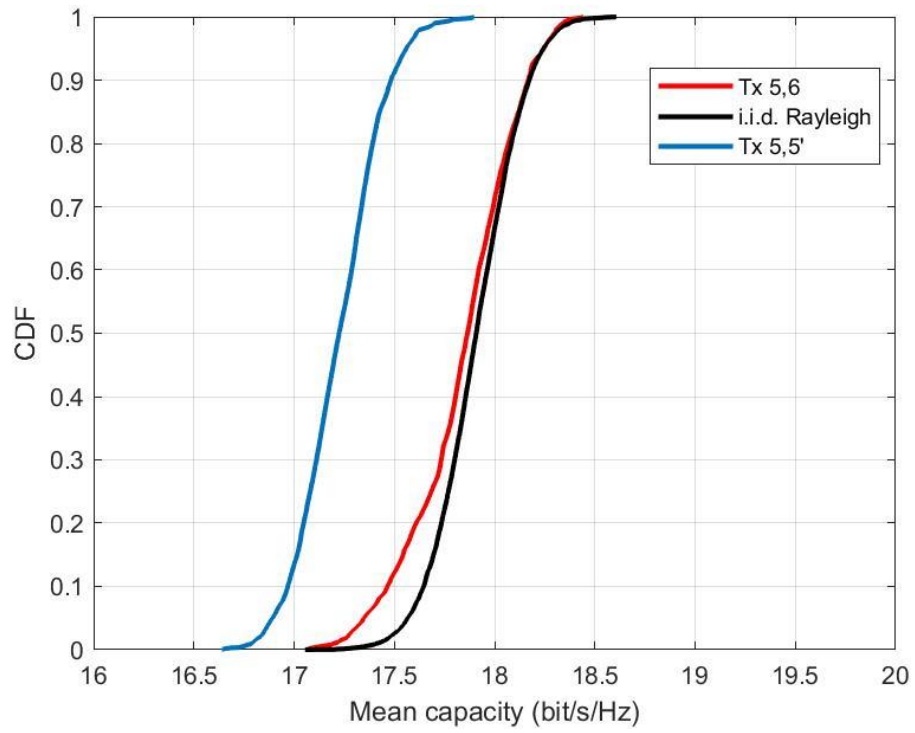


Figura 38. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 6, utilizando el MIMO concentrado.

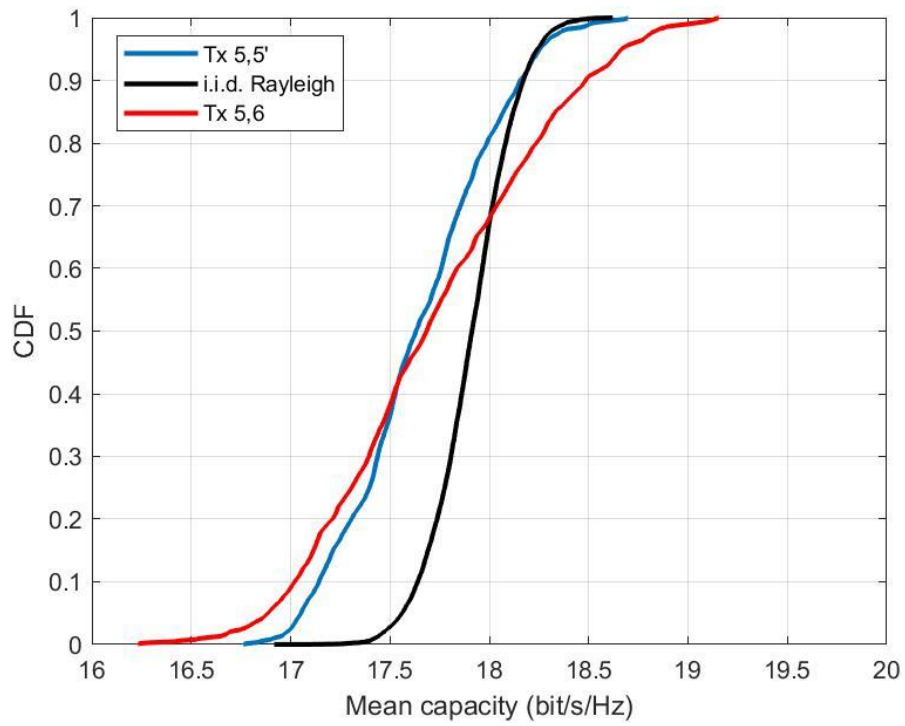


Figura 39. CDF de la capacidad de los transmisores 5 y 5', y 5 y 6, utilizando el MIMO distribuido.

En este último caso, en el caso del MIMO concentrado, la capacidad es peor que en el caso anterior en el que se utilizaba el transmisor 5 y 10, ya que ahora los canales se parecen más en este caso. Sin embargo, en el caso del MIMO distribuido las capacidades son parecidas, ya que la estación base no es única y tienen diferentes estaciones cercanas a las que conectarse.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

A lo largo de este TFG se ha presentado un estudio del canal radio *indoor*, utilizando la tecnología MIMO masivo para su aplicación en comunicaciones de quinta generación. El objetivo principal era el de caracterizar el canal radio para la banda de 26 GHz y comparar las prestaciones en cuanto a capacidad entre el uso del MIMO concentrado y el MIMO distribuido en la planta 0 del edificio ETSIT de la Universidad de Cantabria. Para ello, se ha realizado una primera campaña de simulaciones, en la cual se ha ido variando el número de transmisores conectados a la red, y un segundo grupo de simulaciones, con parejas de transmisores muy cercanos entre sí, en la que se ha observado cómo afecta la similitud de canales en el uso de MIMO masivo.

Atendiendo a los resultados obtenidos en la primera parte anteriormente mencionada, la capacidad suma obtenida para este escenario propuesto cuando se utiliza MIMO distribuido siempre es mayor que la obtenida para MIMO concentrado. Además, a medida que el número de usuarios activos incrementa, esta diferencia se hace mayor. Esto se debe a que, con MIMO distribuido, la señal llega mejor a todos los lugares de la planta, incluso de las salas en los extremos de esta. Sin embargo, con MIMO concentrado, aunque la señal es mucho mejor en zonas cercanas a la estación base, a medida que te alejas de ésta, la señal pierde intensidad, y en los extremos de la planta apenas llega.

Otra característica que se puede observar es que en los casos en los que se utilizan 5 y 10 transmisores, la capacidad suma obtenida en el caso en el que los transmisores se encuentran separados es algo mayor que en el caso en el que los transmisores se encuentran más juntos entre sí. Esto es debido a que, en MIMO masivo, como se ha comentado anteriormente en este trabajo, utiliza la multiplexación espacial. En el caso en el que los usuarios activos están juntos, los canales se van a parecer más entre sí, y esto hace que se puedan producir interferencias entre ellos, y, por lo tanto, que su capacidad suma sea menor.

En el segundo experimento, considerando transmisores muy cercanos entre sí, se obtiene como conclusión principal que la similitud de canales influye en gran medida en la capacidad ofrecida en el enlace. En las comparaciones entre canales de tipo LOS, por un lado, la capacidad es mayor ya que existe visión directa entre el usuario y la estación base. Sin embargo, por otro lado, los canales se parecen más, y por lo tanto la capacidad disminuye debido a las interferencias por la multiplexación espacial que utiliza el MIMO masivo.

En el caso de los canales de tipo NLOS, al no haber visión directa entre los transmisores y la estación base, se produce más multicamino, esto es más reflexiones y difracciones de la señal, y por ello, los canales son algo más diferentes, aunque en términos de capacidad para los casos propuestos en el capítulo anterior no han tenido una gran diferencia.

Hay que destacar también la influencia del escenario en donde se encuentre el enlace. Como se ha visto, en el ejemplo utilizado con los transmisores 7 y 12, el escenario en el que se encuentran es un pasillo relativamente estrecho. Esto hace que se cree una simetría en el trazado y reflexión de los rayos entre la estación base y estos transmisores, haciendo que los canales sean más parecidos entre sí. Comparando la capacidad alcanzada en este ejemplo con los demás, se puede observar que se obtiene una capacidad mucho más baja que en los otros casos, donde no existe ese “efecto pasillo”, y, por lo tanto, los canales difieren algo más entre sí.

5.2 Líneas futuras

Finalmente, para poner punto final a este TFG, se presentan algunas líneas futuras que puedan dar continuidad a este estudio realizado en este trabajo.

En este trabajo se ha utilizado el MIMO masivo, la novedosa tecnología que cumple con los requisitos del 5G. Más concretamente, se han visto dos vertientes de ésta, el MIMO concentrado y el MIMO distribuido. La herramienta CINDOOR, utilizada para realizar este TFG, te permite realizar mapas de cobertura con varias antenas a la vez. Sin embargo, en cada punto del mapa te indica la máxima potencia de señal que llega de la estación base que más cobertura ofrece en ese punto. Por ello, una posible línea futura podría ser el desarrollo de un software que permita indicar la potencia que recibe ese punto del conjunto de todas las estaciones base, y no solo de la que más potencia recibe, y así poder utilizarlo para realizar mapas de cobertura con MIMO masivo.

Otra posible línea futura sería, viendo los buenos resultados de las simulaciones, realizar mediciones para este mismo escenario y compararlas con las simulaciones, para ver si los buenos resultados son reales, para contrastar y validar los resultados obtenidos de las simulaciones, para poder utilizar el simulador CINDOOR en el despliegue de redes 5G en interiores que utilicen la tecnología MIMO masivo. Al ser un escenario grande, la ejecución de estos pasos puede ser compleja, y se necesitará bastante tiempo para conseguir el objetivo final.

Referencias

- [1] 5G – Quinta generación de tecnologías móviles. (2019, diciembre). ITU. <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
- [2] ITU-R. (2015d, septiembre). *Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante* (M.2083-0). <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083/es>
- [3] Evoca. (2019). *El impacto del 5G*. <http://evocaimagen.com/cuadernos-tecnologia/cuadernos-evoca-tecnologia-1.pdf>
- [4] W. S. H. M. W. Ahmad *et al.*, "5G Technology: Towards Dynamic Spectrum Sharing Using Cognitive Radio Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14460-14488, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966271.
- [5] ITU-R. (2015c, julio). *IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030* (M.2370-0). <https://www.itu.int/pub/r-rep-m.2370>
- [6] L. M. Ramadhan, R. P. Astuti and B. S. Nugroho, "Simulation of Design and Analysis Massive MIMO Array Microstrip Rectangular Patch Dualband 3.5 GHz and 26 GHz for 5G Communications," 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob), 2019, pp. 28-32, doi: 10.1109/APWiMob48441.2019.8964213.
- [7] E. (s. f.). *What is MIMO: Multiple Input Multiple Output Technology*. Electronics notes. <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/what-is-mimo-multiple-input-multiple-output-wireless-technology.php>
- [8] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," in *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 11-22, 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793.
- [9] *Artículo sobre MIMO*. (s. f.). Universidad Politécnica de Madrid. <http://www.grc.ssr.upm.es/Portal%205G/subsitio/Informes%20y%20Notas/ARTICULO%20Sobre%20MIMO.pdf>
- [10] Piqué, I. (2018, julio). *Estudio de sistemas de Beamforming analógico-digitales*. Universidad Carlos III de Madrid.

- [11] C. Wang, E. K. S. Au, R. D. Murch, W. H. Mow, R. S. Cheng and V. Lau, "On the Performance of the MIMO Zero-Forcing Receiver in the Presence of Channel Estimation Error," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 805-810, March 2007, doi: 10.1109/TWC.2007.05384.
- [12] Pérez, Jesús R., Óscar Fernández, Luis Valle, Abia Bedoui, Mohamed Et-tolba, and Rafael P. Torres 2021. "Experimental Analysis of Concentrated versus Distributed Massive MIMO in an Indoor Cell at 3.5 GHz" *Electronics* 10, no. 14: 1646. <https://doi.org/10.3390/electronics10141646>
- [13] You, X., Wang, J., & Wang, J. (2020). *Distributed MIMO and Cell-Free Mobile Communication*. Springer Publishing.
- [14] Z. Chen, E. Björnson and E. G. Larsson, "Dynamic Resource Allocation in Co-Located and Cell-Free Massive MIMO," in *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 4, no. 1, pp. 209-220, March 2020, doi: 10.1109/TGCN.2019.2953575.
- [15] CITY UNIVERSITY OF HONG KONG. (2014, octubre). *To Co-locate or to Distribute: A Comparative Study on the Asymptotic Downlink Performance of MIMO Cellular Networks with Massive Base-station Antennas*. http://www.ee.cityu.edu.hk/~lindai/Thesis_Zhiyang
- [16] J. Moreno, M. Domingo, L. Valle, J. R. Lopez, R. P. Torres and J. Basterrechea, "Design of Indoor WLANs: Combination of a ray-tracing tool with the BPSO method.," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 6, pp. 22-33, Dec. 2015, doi: 10.1109/MAP.2015.2480078.
- [17] R. P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredó and M. C. Díez, "CINDOOR: an engineering tool for planning and design of wireless systems in enclosed spaces," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 11-22, Aug. 1999, doi: 10.1109/74.789733.
- [18] ITU-R. (2015a, julio). *Efectos de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas por encima de unos 100 MHz* (P.2040-1). <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2040/es>

